

Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Disparités socio-économiques dans la présence des îlots de chaleur : un cas cartographié
de la Ville de Sherbrooke

Sophia Tran

Essai présenté pour l'obtention du grade de Maître en sciences géographiques (M.Sc.),
cheminement en Géodéveloppement durable

Juin 2019

© Sophia Tran, 2019

Résumé

Le présent travail montre un portrait des entités des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains de la Ville de Sherbrooke. Des indicateurs socio-économiques y sont également représentés afin de démontrer s'il y existe une disparité socio-économique en présence d'îlots de chaleur urbains, soit une corrélation spatiale. Les données LiDAR y sont aussi utilisées pour avoir un aperçu du couvert arborescent qui affecterait la quantité des îlots de chaleur. Un taux de risque par aire de diffusion a été réalisé pour identifier les zones à prioriser lors des périodes de canicules ce qui limiterait potentiellement les risques de santé et de mortalité des citoyens par des interventions de sensibilisation et d'aménagement.

Remerciements

Je tiens à remercier personnellement mes superviseurs, Prof Goze Bertin Béné et Dr Yves Voirin. Par leur supervision, je rends un essai qui suit mes intérêts et d'une meilleure qualité académique. Je leur souligne ma reconnaissance. Je souligne également l'aide apportée par mes collègues durant ma maîtrise, car ils m'ont appuyée à parfaire mes rapports et mes connaissances. Je remercie également les enseignant(e)s de la maîtrise pour les apprentissages acquis. Finalement, j'apprécie l'aide fournie par M. Simon Trottier, conseiller en Système d'information géographique (SIG) de l'Université de Sherbrooke, lors des manipulations de données du présent essai.

Table des matières

Résumé.....	ii
Remerciements.....	iii
Tables des matières.....	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	vii
Liste des acronymes	viii
1. Introduction	1
1.1. Mise en contexte.....	1
1.2. Problématique	3
1.3. Objectifs	4
2. Cadre théorique.....	5
2.1. Changements climatiques en milieu urbain	5
2.1.1. Description générale du changement climatique	5
2.1.2. Préoccupations face aux changements climatiques	6
2.1.3. Présence des îlots de chaleur urbains	7
2.1.4. Conséquences des îlots de chaleur urbains	8
2.2. Injustice environnementale	10
2.2.1. Description générale de l'injustice environnementale	10
2.2.2. Préoccupations face à l'injustice environnementale	11
2.3. Caractérisation des îlots de chaleurs	12
2.3.1. Données	12
2.3.2. Méthodes	13
2.4. Indice de canopée urbaine.....	15
2.4.1. Description générale	15
2.4.2. Application de cet indice pour Sherbrooke	16
3. Site d'étude	18
4. Données	21
4.1. Données pour le portrait	21
4.2. Données pour l'indice de canopée urbain	22

4.3. Données pour priorisation des AD lors des canicules	23
5. Méthodologie	24
5.1. Portrait socio-économique	24
5.2. Calcul de l'indice de canopée urbain.....	26
5.3. Identifier les lieux à prioriser.....	31
6. Résultats.....	33
6.1. Cartographie des données socio-économiques dans les ICU de la zone étudiée.....	33
6.2. Cartographie de l'indice de canopée urbaine pour la zone étudiée	37
6.3. Cartographie des lieux à prioriser pour la zone étudiée	39
7. Interprétation et discussion des résultats	41
7.1. Comparaison et analyse des aires de diffusion de Sherbrooke à travers les données socio-économiques et l'ICU.....	41
7.2. Évaluation de la qualité de l'indice de canopée urbaine dans la ville de Sherbrooke.....	43
7.3. Évaluation de la qualité des lieux à prioriser lors des canicules dans la Ville de Sherbrooke.....	45
8. Conclusion, limites et recommandations.....	47
9. Références	50

Liste des figures

Figure 1. Exemple de carte des classes de température de surface calculées à partir de la bande thermique du capteur ETM+ de Landsat pour la région de Québec tiré de CERFO (2013a)	14
Figure 2. Exemple de carte des couronnes des arbres dans la ville de Vancouver tiré de Matasci <i>et al.</i> (2018).....	16
Figure 3. Site d'étude général (La Ville de Sherbrooke).....	18
Figure 4. Zone d'étude précise de l'essai, 2016 (Périmètre urbain)	19
Figure 5. Exemple de la différence entre les formats vectoriel et matriciel de la classe 9 des données d'îlots de température	22
Figure 6. Organigramme méthodologique	24
Figure 7. Formule dans Raster Calculator sur ArcGIS	28
Figure 8. Exemple de MNS normalisé de plus de 7 mètres découpé avec le masque de structures (Exemple de bâtiment restant, en noir uniforme)	29
Figure 9. Exemple de la couche de canopée sur la couche des AD	30
Figure 10. Cartographie des pourcentages d'îlots de fraîcheur et de chaleur dans les aires de diffusion	34
Figure 11. Cartographie des données socio-économiques de la zone étudiée	35
Figure 12. Cartographie de l'indice de canopée urbaine pour la zone étudiée (5 classes par Natural Breaks de Jenks)	37
Figure 13. Cartographie des lieux à prioriser pour la zone étudiée.....	39
Figure 14. Exemple de l'AD 24430180 (en vert, les IFU; en rouge, les ICU; plus l'altitude est élevée, plus le pixel est sombre)	44

Liste des tableaux

Tableau 1. Récapitulatif des données de l'essai	23
Tableau 2. Pondération pour l'analyse multicritère de priorisation	32
Tableau 3. Fréquence des AD selon les intervalles de pourcentage de la superficie des îlots de chaleur et de fraîcheur (aperçu primaire des AD et des îlots à l'intérieur de Sherbrooke)	33
Tableau 4. Analyse des indicateurs de notre zone d'étude.....	36
Tableau 5. Analyse entre les indicateurs socio-économiques et les concentrations d'îlots de notre zone d'étude par aire de diffusion	36
Tableau 6. Fréquence des AD selon les intervalles de pourcentage pour l'indice de canopée.....	38
Tableau 7. Valeurs des indicateurs socio-économiques des zones à risque (rouge).....	40

Liste des acronymes

CC	Changements climatiques
GES	Gaz à effet de serre
ICU	Îlots de chaleur urbains
IFU	Îlots de fraîcheur urbains
LiDAR	Light Detection And Range
MNC	Modèle numérique de canopée
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain
NDVI	Indice de végétation par différence normalisée
TIN	Réseau triangulaire irrégulier

1. Introduction

1.1. Mise en contexte

Les gaz à effet de serre (GES) sont des composantes naturelles de l'atmosphère qui permet de garder les températures moyennes planétaires à 15°C au lieu de -18°C. En revanche, les activités anthropiques depuis les deux derniers siècles accélèrent les changements du climat par l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère (Équiterre, 2019) modifiant ainsi l'équilibre atmosphérique (Nature Québec, 2004). La croissance démographique et la déforestation depuis les années 1960 participent aussi à l'effet de serre et au réchauffement climatique (Fortin, 2005). La contribution des GES d'origine humaine entraîne un déséquilibre atmosphérique qui s'exprime par une hausse au niveau des températures moyennes de la surface de la Terre (Nature Québec, 2004).

Les changements climatiques influencent la sévérité et la fréquence des vagues de chaleur à travers le monde. Ainsi, une des conséquences du changement climatique est le réchauffement du climat à l'échelle de la planète (Ho *et al.*, 2018; Gaumont, 2019) qui résulte en une température moyenne annuelle augmentée. Cette dernière se traduit par une fréquence en jour et par une amplitude en intensité et en durée des périodes de canicule (Gaumont, 2019). Les populations humaines, à l'intérieur d'un même pays et dans différents pays, subissent différemment ce phénomène causé par les pollutions. Elles sont également exposées de plusieurs manières aux risques environnementaux (Larrière, 2017). Ces situations concernent l'injustice environnementale et cette dernière est un thème apparu aux États-Unis au début des années 1980. Elle a été mise de l'avant par les mouvements de la population afro-américaine revendiquant le droit d'habiter dans des lieux non pollués ou non exposés à de majeures nuisances environnementales (Apparicio *et al.*, 2013).

Au niveau des changements climatiques au Québec, il y a quatre grands enjeux auxquels une attention particulière doit être apportée. Les infrastructures, les bâtiments et les équipements sont le premier enjeu puisque les conditions climatiques (événements) peuvent modifier leur intégrité (structures de l'environnement bâti) qui peut mettre en péril la sécurité et le bien-être des populations. Certains services ne pourraient plus être assurés. Le deuxième enjeu est les activités économiques. Les changements climatiques affectent

la productivité de plusieurs activités telles que la foresterie, l'agriculture et l'hydroélectricité. La demande et les prix de différents biens et services vont également être touchés puisqu'il y a restriction sur la disponibilité des ressources et une augmentation des coûts d'approvisionnement. Les activités touristiques et de loisirs (golf, ski, etc.) dépendent également du climat. Le secteur agricole pourrait être avantagé ou désavantagé par les conditions climatiques selon sa capacité d'adaptation. Le troisième enjeu vise les espèces et les écosystèmes. Les variations climatiques déterminent la répartition territoriale des espèces animales et végétales. Les milieux naturels quant à eux vont être altérés créant ainsi des impacts sur la dynamique écologique des écosystèmes (apparition de nouvelles espèces et compétition territoriale entre les populations). Le dernier enjeu concerne la santé humaine. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité de certains phénomènes (vagues de chaleur, feux de forêt ou friche, tempête estivale ou hivernale, pollution atmosphérique, îlots de chaleur urbains) causée par les changements climatiques va perturber directement le bien-être des humains. Certains groupes d'individus sont singulièrement vulnérables à ces phénomènes (RNCREQ, 2019).

Au Québec, en 2018, il y a eu près 90 morts lors de la période de canicule (Bénice, 2018). Cette période a duré plus ou moins une semaine entre fin juin et début juillet (MELCC, 2019). Plus du tiers de ces morts provient de Montréal (Bénice, 2018). En milieu urbain, le climat local est influencé par différents paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité et le vent. En plus de ces paramètres, des causes anthropiques favorisent la création et le maintien des îlots de chaleur urbains (ICU). Un îlot de chaleur représente une température de 5 à 10°C plus élevée que l'environnement immédiat (Anquez et Herlem, 2011). Les impacts des îlots de chaleur urbains se manifestent sous forme entre autres de smog et de chaleur accrue (INSPQ, 2019). Parallèlement, une de ces causes est la perte continue du couvert végétal en ville (INSPQ, 2019). La végétation apporte une contribution contre les ICU par leurs effets d'ombrage, d'évaporation et/ou de rafraîchissement de l'air (Nature Québec, 2013). Ne pas avoir accès ou un accès limité à un microclimat favorisé par la végétation est un désavantage face aux ICU qui équivaut à de l'injustice environnementale (Pham *et al.*, 2010).

1.2. Problématique

La Ville de Sherbrooke couvre une superficie de 353,76 km² et la densité de sa population est de 456 personnes au km² (Statistique Canada, 2019). Un des enjeux d'aménagement de Sherbrooke est d'enrichir et de protéger son couvert forestier en milieu urbain puisqu'en dehors de ce contexte son capital d'aire à valeur écologique, soit le couvert végétal, est important (Ville de Sherbrooke, 2014). La perte de ces couverts végétaux favorise le phénomène des ICU qui sont variables selon la journée et la saison. Ces ICU sont présents dans la Ville de Sherbrooke, car les cadres bâtis non réfléchissants tels que l'asphalte stockent la chaleur du rayonnement solaire. De plus, cette chaleur est libérée durant la nuit maximisant lors des périodes nocturnes l'intensité des ICU (Anquez et Herlem, 2011). Une population sous ces circonstances et cette présence de chaleur peut avoir sa condition de santé affectée; éventuellement, il y a risque de mortalité (CIUSSS, 2018) puisque ce phénomène détériore la qualité de vie en ville (Parmentier, 2010).

Une étude aiderait à voir quelle partie de la population de Sherbrooke vit dans les ICU. Extraire les caractéristiques socio-économiques de la population de la ville dans la présence des ICU aiderait à connaître les populations et les zones à risque. Ces informations permettent d'adapter les solutions pour contrer les ICU et les situations d'intervention possible. Beaucoup d'études sur les disparités socio-économiques existent et ont pris comme site d'étude une métropole comme celles faites à Montréal (Pham *et al.*, 2010; Apparicio *et al.*, 2013; Baudoin *et al.*, 2007). Ainsi, il serait intéressant de transposer ces analyses sur une ville urbaine en contexte rural comme Sherbrooke dans l'intention de cartographier l'étendue de la présence des îlots de chaleur sur son territoire par rapport aux caractéristiques socio-économiques de la population puisqu'il y a peu de cartes thématiques reliées à la présence des ICU pour le territoire de cette ville. Il a déjà été démontré qu'à Montréal les populations socioéconomiquement vulnérables sont les plus affectées par les ICU (CIUSSS, 2018). Une analyse de la situation est nécessaire pour la Ville de Sherbrooke afin de savoir si la même situation prévaut.

L'apport de la géomatique dans ce projet est important. Elle permet d'avoir une meilleure compréhension de la spatialité des îlots de chaleur urbains de la Ville de Sherbrooke avec en juxtaposition la population provenant de différents milieux socio-économiques dans

l'intention de démontrer une corrélation entre les données. La composition géographique de cette thématique est une mesure de la justice environnementale puisqu'il nécessite de démontrer si les populations socioéconomiquement vulnérables sont exposées aux ICU. De plus, les données géomatiques permettent d'analyser la structure des îlots de chaleur urbains apportant ainsi pour les gestionnaires et planificateurs en aménagement urbain, et autres acteurs connexes une connaissance supplémentaire puisque les cadres bâti et naturel dans les ICU y sont connus. Cette connaissance pourrait apporter une manière de consolider le milieu urbanisé sherbrookoïse dans une perspective de développement durable. À la suite de cette compréhension à jour, une diffusion à la population des cartes thématiques pourrait aider aux campagnes de sensibilisation lors des périodes de vague de chaleur afin de les contrer et de limiter les pertes humaines.

1.3. Objectifs

Le but de ce projet est de produire un portrait des ICU pour la Ville de Sherbrooke en lien avec les caractéristiques socio-économiques de la population du territoire afin d'en faire une analyse. Cet objectif va déterminer les zones et les populations à risque, car il y a une identification de la localisation et du profil des populations favorisées ou défavorisées par rapport aux ICU. Les caractéristiques socio-économiques améliorent l'analyse et la compréhension des besoins de la Ville de Sherbrooke pour réduire l'impact des îlots de chaleur.

Pour répondre à cet objectif principal, trois objectifs secondaires ont été énoncés.

1. Le premier objectif secondaire est d'identifier les caractéristiques socio-économiques des quartiers (population) de Sherbrooke où les ICU y sont présents et évaluer ces raisons socio-économiques.
2. Le deuxième objectif secondaire est de produire un indice de canopée urbain afin d'avoir une compréhension de l'architecture végétale qui influence la chaleur d'un lieu.
3. Le troisième objectif secondaire vise à déterminer les ICU sur le territoire de la Ville de Sherbrooke qui seront prioritaires aux adaptations et interventions dans le cas d'une situation alarmante.

2. Cadre théorique

Une cartographie des îlots de chaleur urbains et de la population de la Ville de Sherbrooke nous permet d'obtenir un portrait global de la situation et de comprendre quelles sont les personnes affectées et quels sont les moyens d'intervention. Une bonne compréhension de la structure présente dans les ICU pourrait aider à modifier les caractéristiques environnementales des ICU afin d'améliorer les conditions de vie et de santé de sa population. Les disparités socio-économiques pourraient être diminuées, car les impacts des ICU seraient atténués en homogénéisant la température de la ville à travers le cadre bâti.

2.1. Changements climatiques en milieu urbain

2.1.1. Description générale du changement climatique

Les activités anthropiques ont provoqué une hausse de la concentration des gaz à effet de serre (GES) ce qui résulte en un accroissement du réchauffement de l'atmosphère terrestre. La hausse de la température progresse dans le temps et la décennie 2001-2010 a été enregistrée comme la plus chaude jusqu'à maintenant (RNCREQ, 2019). Ces modifications des températures moyennes planétaires ont des répercussions sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de la Terre (Nature Québec, 2011).

Les GES sont omniprésents dans l'atmosphère. Ils forment une couche autour de la Terre afin de permettre à la planète de conserver naturellement sa chaleur, c'est-à-dire un effet de serre. Comme le Soleil réchauffe la planète avec ses rayonnements, cette dernière en conserve une partie en l'emprisonnant avec les GES et réémet ensuite une partie vers l'espace. Ce processus permet de conserver les températures moyennes de la Terre à 15°C. Sans quoi, la température moyenne planétaire chuterait à -18°C ce qui ne permettrait pas la présence de vie telle que nous la connaissons en ce moment. Une concentration de GES générée des activités anthropiques amplifie l'effet de serre naturel et elle est supérieure à tout ce que la Terre a connu depuis 650 000 ans. Ce déséquilibre change la température de la surface de la planète et cause, du même coup, des impacts sur l'environnement (Nature Québec, 2004).

2.1.2. Préoccupations face aux changements climatiques

À l'échelle planétaire, les changements climatiques amènent certains déséquilibres qui sont responsables de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes et des anomalies climatiques comme entre autres les sécheresses intenses, les pluies diluviennes, les tempêtes tropicales et les ouragans ravageurs. Il y a plus d'impacts négatifs des changements climatiques que leurs effets positifs relatifs (RNCREQ, 2019; Bourque, 2000). Au niveau planétaire, une augmentation de 1,4 à 5,8°C des températures moyennes est estimée pour le présent siècle (Nature Québec, 2004).

La fonte des glaces est en accélération depuis une quinzaine d'années due aux changements climatiques. Avec la couverture de glace de mer en diminution, il y a un déplacement des espèces vers le nord et le niveau des mers à l'échelle de la planète a grimpé (Warren *et al.*, 2004; Nature Québec, 2004) ce qui affecte une grande partie de la population mondiale puisque celle-ci vit sur les basses terres côtières. Depuis 2008, 20 millions d'habitants se sont déplacés à cause des désastres engendrés. L'eau potable subit également les impacts des changements climatiques. Par exemple, la hausse des températures cause l'évaporation de l'eau douce diminuant ainsi sa quantité. La diminution de cette ressource pourrait être une source de conflits entre les nations. La qualité de l'eau devrait aussi être surveillée, car il pourrait avoir une intensification de la prolifération d'espèces envahissantes. Les patrons de précipitations sont modifiés par les changements climatiques qui amènent leurs lots de problèmes en augmentant et intensifiant les événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresses, canicules, tornades, etc.). Ces événements sont également origines de catastrophes pouvant être plus fréquentes dans le futur (Nature Québec, 2004).

Une des conséquences des changements climatiques exprimées par les scientifiques est celle sur la santé humaine. Au Canada, on prévoit une augmentation des maladies liées à la respiration par les chaleurs intenses, et il devrait aussi y avoir une amplification des maladies transmises par les insectes et les animaux. Pour le secteur de l'agriculture, des impacts positifs et négatifs vont être ressentis. L'accroissement des températures et l'allongement des saisons de croissance devraient augmenter la production des cultures affectant le rendement en adaptant ces cultures aux températures élevées. Les saisons hivernale et automnale sont affligées lors des changements climatiques par les redoux, ce

qui impacte les cultures pérennes pour l'un et les plantes fourragères pour l'autre. Les insectes ravageurs risquent d'envahir l'environnement naturel comme les changements climatiques sont propices à leur reproduction. De plus, il y a la modification de la répartition des espèces et de sa période de présence qu'on devrait observer. Il faudra, donc, que dès maintenant les producteurs changent leurs façons de produire pour minimiser les effets des modifications climatiques (Nature Québec, 2004).

Des actions ont été et sont posées pour limiter l'augmentation de la température du globe à un maximum de 2°C (RNCREQ, 2019). Le protocole de Kyoto en 1997 en est un exemple. Cette entente de la communauté internationale avait pour objectif de faire réduire de 5,2 % les émissions de GES de plusieurs pays, car les actions pour lutter contre les changements climatiques devraient être réalisées maintenant pour qu'elles soient avantageuses comparées aux adaptations imposées par les impacts climatiques. Bien que des avertissements ont été émis par les scientifiques du climat, les pays développés continuent annuellement à augmenter leurs émissions de GES (Nature Québec, 2004). Le Canada a publié un programme afin d'atténuer sa vulnérabilité face aux changements climatiques et d'enrichir les informations en matière de décision pour les mesures d'adaptation (Warren *et al.*, 2004).

2.1.3. Présence des îlots de chaleur urbains

Les ICU se réfèrent à l'air ambiant et aux températures de surfaces dans les zones urbaines avec une différence en degré Celsius plus élevée que les zones rurales à proximité (Huang *et al.*, 2011) tandis que les îlots de chaleur intra-urbains sont les zones urbanisées marquées par des températures estivales plus élevées que celles dans leur immédiat avec une variation de 5° à 10°C (Lareau et Maletto, 2019). Ce sont des zones contenant un microclimat distinct de ses voisins et ses comportements sont influencés par les facteurs macroclimatiques ce qui les rend complexes (Mika *et al.*, 2018). Les effets de l'élévation des températures se combinent avec les changements des patrons de précipitations, des climats extrêmes et des impacts de la pollution de l'air dans les aires urbaines (Filho *et al.*, 2018). La présence des ICU est due au remplacement de la terre et de la végétation par des surfaces imperméables telles que l'asphalte et le béton (Huang *et al.*, 2011).

Dans les ICU, les surfaces sont généralement plus sombres et absorbent plus les rayonnements solaires que les aires aux alentours (Wang et Akbari, 2016). Les bâtiments en hauteur et les rues, soit la structure urbaine, changent les flux de radiation, car ils ont une capacité à la chaleur extrême puisqu'ils stockent la chaleur durant le jour et la relâche lentement durant la nuit (Huang *et al.*, 2011; Wang et Akbari, 2016). L'industrialisation est également une des raisons des ICU. De plus, en milieu urbain, il y a libération d'une chaleur anthropique du déroulement des activités des quotidiens des habitants (Huang *et al.*, 2011) telles que l'utilisation des climatiseurs d'air (Wang et Akbari, 2016).

2.1.4. Conséquences des îlots de chaleur urbains

Les ICU ne sont pas seulement une augmentation de la température de l'air, mais représentent également une augmentation en consommation d'énergie pour alimenter les airs conditionnés créant ainsi plus d'ozone au niveau du sol. Ce dernier a des conséquences directes pour la santé humaine (Huang *et al.*, 2011). Parallèlement, la demande élevée en électricité pour faire fonctionner l'air conditionné peut engendrer des pannes de courant durant les événements de températures extrêmes.

Lors d'événements majeurs, il existe un danger considérable au niveau de la santé publique (déshydratation, épuisement, trouble respiratoire) (Wang et Akbari, 2016; Filho *et al.*, 2018). Les vagues de chaleur ainsi que les canicules sont des désastres qui prédominent les causes de la mortalité humaine provenant des risques naturels dans les sociétés post-industrielles. Nous pouvons prendre pour exemple l'été 2003 qui en Europe était le plus chaud depuis 1500 (Huang *et al.*, 2011). Cet événement choqua le monde avec 70 000 morts en Europe en lien avec la température accablante. Ce nombre de morts est prédit pour un été typique à partir de 2040 (Huang *et al.*, 2011; Taylor *et al.*, 2015). L'eau et l'air de ces zones sont affectés par l'augmentation de la température (Filho *et al.*, 2018). Des études sur la mortalité reliée à la chaleur en Europe ont démontré que les individus les plus vulnérables sont les gens les plus âgés, ceux avec des conditions de santé préexistantes, ceux qui sont isolés socialement, et ceux vivant au dernier étage d'un appartement en manque d'isolant thermique ainsi que les personnes habitant dans les foyers de soin (Taylor *et al.*, 2015).

Les études sur les caractéristiques socio-économiques des populations avoisinant les lieux les plus chauds peuvent localiser les personnes les plus directement vulnérables aux chaleurs accablantes. Les études mettent en avant le concept nommé l'injustice environnementale. Ces recherches peuvent être des résultats signifiants pour les professionnels chargés pour les interventions de chaleur accablante comme les planificateurs urbains et les fournisseurs de soins de santé. En plus, il permet d'exprimer explicitement les relations spatiales des endroits où les activités de prévention seraient bénéfiques. Les programmes tels que ceux de plantations d'arbres pourraient être réalisés afin d'offrir de l'ombre en présence d'ICU (Huang *et al.* 2011).

Selon un travail réalisé dans huit villes canadiennes par Wang et Akbari (2016), on observe une modification du nombre de jours de chaleur par année passant d'une moyenne de 10 jours (1961-1990) à 22 jours (après 2020). Santé Canada rapporte que, dans sept villes canadiennes lorsque la température moyenne de la journée est plus haute que 20°C, la mortalité relative croît de 2,3 % pour chaque hausse du degré de la température ambiante. Puisque 70 % des Canadiens vivent en milieu urbain, il faut prendre en considération que les ICU, les changements climatiques et leurs effets sur les infrastructures électriques sont une menace envers la sécurité et la santé de la population (Wang et Akbari, 2016).

2.2. Injustice environnementale

2.2.1. Description générale de l'injustice environnementale

La justice environnementale provient d'un mouvement développé aux États-Unis dans les années 1980 pour contrer les impacts disproportionnés des pollutions sur les minorités, c'est-à-dire lutter contre les inégalités raciales en introduisant les préoccupations environnementales (Fol et Pflieger, 2010). Depuis le début du siècle, l'injustice environnementale est un cadre théorique distinct qui relie les concepts de l'environnement, de l'ethnicité, de la classe sociale, du genre et les préoccupations natives de la justice sociale (Pham *et al.*, 2010). Les mouvements écologistes de protestation axée sur la justice environnementale réclament un droit à un environnement sain qui inclut la sécurité et la santé des populations ainsi qu'un maintien de la pérennité de la qualité du territoire (Scarwell, 2019). Ces citoyens contestent sur le choix du développement (infrastructures, activités industrielles) qui comporte des risques pour la vie humaine (Fortin, 2005).

Une des manières d'évaluer la justice environnement est de prendre en considération la proximité des sources de nuisance, et des équipements et services collectifs vis-à-vis des citoyens. Les populations grandement affectées par les injustices environnementales ont cumulé non seulement une proximité aux éléments négatifs, mais également un éloignement aux éléments positifs (Apparicio *et al.*, 2010).

Dans notre cas d'étude, l'injustice environnementale se présente sous la forme d'une absence d'espaces verts ou d'implantations d'arbres dans les quartiers défavorisés amenant un lot de problèmes liés à ce manque et aux effets des changements climatiques. Plusieurs études ont fait une mise en garde contre la gentrification verte qui peut créer de nouvelles inégalités. Le développement des espaces verts crée un embourgeoisement du quartier (installation de certaines classes de la population) en ignorant les classes socioéconomiquement démunies déjà présentes. Toutefois, les espaces verts apportent des bénéfices. Leur accès équitable permet d'améliorer les inégalités sociales et de santé par le bien de l'environnement. (INSPQ, 2017).

2.2.2. Préoccupations face à l'injustice environnementale

Plusieurs recherches ont été réalisées, par exemple Keucheyan (2018), Faburel (2012), et Wolch *et al* (2014), pour démontrer que les espaces verts urbains sont mal répartis dans les villes où existent des niveaux de ségrégation sociale ou raciale importants. Il y a quelques cas observables dans les pays en développement comme dans l'État de Rio de Janeiro ou dans les petites villes en Afrique du Sud. Les populations pauvres et non blanches ont un accès restreint aux espaces verts ou à une végétation moins présente dans leur quartier (Naoufal, 2016). La végétation urbaine améliore la qualité de l'environnement urbain. Elle fournit notamment de l'ombrage réduit les pollutions atmosphériques et sonores, capte une fraction du carbone de l'air et contribue à l'économie d'énergie. Au niveau des bénéfices sociaux, les espaces verts urbains permettent de réduire le stress et contribuent à une intégration sociale chez les personnes âgées et les jeunes (enfants, adolescents), surtout dans les villes multiethniques. D'autres recherches ont montré une corrélation à la hausse entre la valeur immobilière et la proximité à la présence de végétation (Pham *et al.*, 2010).

Dans les pays développés, de nombreux chercheurs ont énoncé des bilans similaires sur la présence de l'injustice environnementale. Ils soulignent que les groupes les plus défavorisés ont fréquemment un accès réduit aux espaces verts de qualité tant au niveau de l'abondance que celui de la diversité végétale. En revanche, son intensité est variable d'une ville à l'autre en proportion avec des facteurs tels que les conditions socio-économiques, les types d'habitats, la valeur foncière de la propriété et les programmes de conservation de la végétation (Pham *et al.*, 2010).

Grâce à ce concept politique, il y a une phase d'institutionnalisation de la justice environnementale qui devient un critère d'évaluation des actions publiques (Fol et Pflieger, 2010). Les législations environnementales jouent un rôle naturel contre les injustices environnementales, et le droit à l'environnement relève des droits et libertés écrits dans la Constitution impliquant ainsi l'État à mettre en place des organismes renseignés qui maîtrisent des connaissances dans le droit environnemental afin de diffuser les informations en lien avec ces droits pour que les populations puissent participer aux processus de décision. Il y a ainsi un équilibre judiciaire des forces dans le système

d'expertise. En plus de cet accès à la justice, il y a réparations matérielles si une nuisance a lieu (Scarwell, 2019).

Au Québec, les municipalités tentent de corriger les situations afin de réduire les inégalités et d'offrir l'accès aux espaces verts. Un embourgeoisement vert peut être une solution face à l'injustice environnementale; toutefois, cela peut créer de nouvelles injustices. Ces secteurs deviennent plus attrayants et du même coup, les coûts reliés au logement pourraient être à la hausse écartant la population vulnérable qu'on voulait aider au départ en leur procurant un environnement plus sain (INSPQ, 2019). Toute situation est mitigée et les solutions (développement des espaces verts) doivent prendre en compte le contexte socio-économique des habitants.

2.3. Caractérisation des îlots de chaleurs

Dans le cadre de ce travail, une carte des îlots de chaleur urbains de la Ville de Sherbrooke est indispensable. Celle présentée dans cet essai a été produite par l'Institut national de santé publique du Québec et le CERFO en 2015. Il ne serait donc pas nécessaire d'en produire une soi-même, mais connaître les procédures de son élaboration serait profitable afin d'avoir un aperçu de la donnée centrale de l'essai. De plus, il y a plusieurs méthodes pour réaliser une carte caractérisant les ICU.

La cartographie des îlots de chaleur se repose sur un modèle de prédiction de la température relative de la surface sur les zones de plus de 400 habitants par km² pour l'ensemble du Québec, soit tout le Québec urbain (Boulfroy *et al.*, 2013).

2.3.1. Données

Des jeux de données ont été préparés pour construire le modèle. La cartographie des ICU se produit à partir des variables explicatives et la température du sol (variable dépendante). Ces données qui représentent chaque paramètre nécessaire pour la création des cartes pour la caractérisation des ICU sont les images satellitaires (les bandes composites), un modèle numérique d'élévation, une carte du réseau hydrique national, les données météo et le numéro de la semaine des images satellites (Boulfroy *et al.*, 2013).

Avant de réaliser la cartographie des ICU du Québec, un sous-échantillonnage a été exécuté pour élaborer et valider le modèle. Seize (16) images du capteur SPOT-5 prises sur différentes années ont été acquises (CERFO, 2013a; Boulfroy *et al.*, 2013). L'acquisition d'une image Landsat ETM+ a également été nécessaire pour chaque secteur couvert par une scène SPOT-5 puisque les images de ce dernier ne sont pas composées de la bande thermique. Quinze (15) images Landsat ETM+ avec une date d'acquisition proche de celle des images correspondantes à celles de SPOT-5 ont été sélectionnées (Boulfroy *et al.*, 2013). Pour l'ensemble du territoire d'étude, à la suite du modèle développé, soixante-sept (67) images SPOT-5 entre 2005 et 2011 (du 15 juin au 9 septembre) ont été obtenues pour couvrir toutes les zones urbaines du Québec (CERFO, 2013a).

2.3.2. Méthodes

Le cadre méthodologique pour cette cartographie se base sur la méthode développée de Kestens *et al.* (2011) en exploitant les mêmes variables explicatives mis à part l'ajout de quelques variables. Les variables ajoutées sont la classification de l'occupation du sol (4 classes au lieu de 2) et l'indice d'imperméabilité des surfaces ainsi que la hauteur de la surface par rapport au niveau de la mer. Les variables retenues sont les données climatiques, l'indice de végétation normalisé, la distance par rapport à l'eau, le positionnement en X et Y, l'altitude et le numéro de semaine d'acquisition de l'image Landsat puisque cette image est tout de même utilisée pour obtenir la mesure réelle de la température grâce à sa bande 6 (Boulfroy *et al.*, 2013; CERFO, 2013a).

Certaines variables explicatives ont dû être testées pour ce modèle prédictif comme les images satellitaires du capteur SPOT-5 sont utilisées (résolution de 20 m) à la place du Landsat (résolution de 60 à 100 m). Pour chaque pixel des segments des scènes de SPOT-5 qui couvre l'étendue géographique du territoire d'étude, l'ensemble des variables explicatives a été déterminé par des calculs. Le modèle a été par la suite appliqué sur chaque pixel et une cartographie de la température de surface prédite a été générée.

Le modèle établi consiste à un modèle mixte élaboré et validé grâce au sous-échantillonnage. 35 099 pixels échantillonnés ont été disposés selon leur classe d'occupation du sol. L'analyse statistique a montré que l'affectation du sol et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) sont les deux variables complémentaires qui

représentent les plus fortes variables explicatives du modèle. Pour valider le modèle théorique, les pixels échantillonnés non utilisés pour le modèle ont été exploités. Des valeurs prédites ont été obtenues par répétition pour 90 % des pixels échantillonnés qui ont permis de prédire 10 % des pixels restants. Une corrélation de coefficient entre les valeurs prédites et observées a validé le modèle.

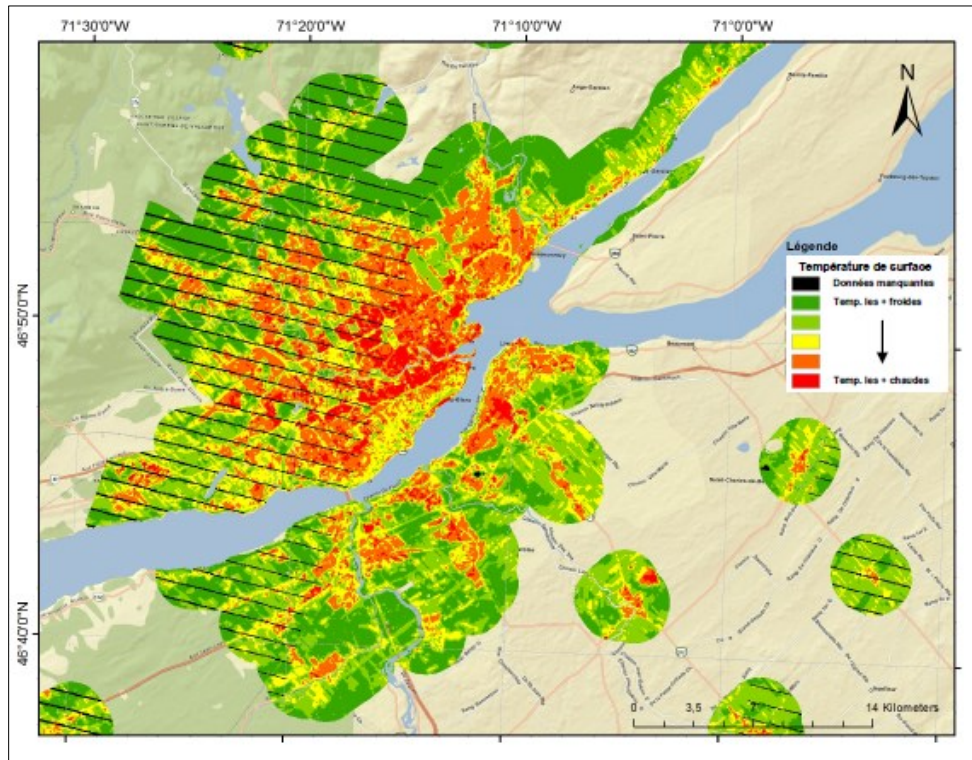


Figure 1. Exemple de carte des classes de température de surface calculées à partir de la bande thermique du capteur ETM+ de Landsat pour la région de Québec tiré de CERFO (2013a)

La carte (Figure 1) permet de localiser les zones les plus chaudes (îlots de chaleur urbains) ou les zones les plus froides (îlots de fraîcheur urbains) avec une précision aux 20 m. Ces zones ont été créées en utilisant un seuillage basé sur la méthode de Jenks d'ArcGIS. Neuf niveaux ont été établis afin d'identifier les zones les plus chaudes selon l'analyse de Kestens *et al.* (2011). Avec neuf classes, il y a également été possible de distinguer les zones les plus fraîches. Ensuite, un filtre de 3 pixels par 3 pixels ou de 60 m par 60 m a été appliqué aux pixels des classes 8 et 9 pour ne garder que les îlots de chaleur urbains avec une concentration de 3 600 m² (Boulfroy *et al.*, 2013).

2.4. Indice de canopée urbaine

2.4.1. Description générale

Les arbres ont un rôle important dans les activités de prévention contre la chaleur puisqu'ils font de l'ombre réduisant ainsi l'exposition à la chaleur et les coûts énergétiques (Huang *et al.*, 2011). L'indice consiste à calculer la superficie de canopée contenue dans un lieu spécifique en référence à la superficie totale. Cet indice peut se faire manuellement ou d'une façon automatique avec différentes données telles que les photos aériennes ou satellitaires.

L'indice de canopée provient d'un simple calcul qui divise la superficie occupée par la canopée d'un territoire donné par rapport à la superficie totale de ce territoire (CERFO, 2015). La canopée consiste à la partie supérieure de l'arbre qui interagit avec le rayonnement solaire (INSPQ, 2017). Il faut identifier la canopée dans la ville pour produire cet indice. Un haut taux de canopée est important en milieu urbain puisqu'une canopée éparpillée capte entre 60 à 80 % des rayons solaires tandis qu'une canopée épaisse ira capter jusqu'à 98 % (Parmentier, 2010). De plus, la chaleur se concentre entre le sol et la cime de la canopée où le déroulement des activités des humains est considérable (INSPQ, 2009). Alors, plus il y a de canopées, plus la chaleur serait captée et réfléchi par le couvert arborescent et moins la chaleur se propagera dans les sols pour générer les îlots de chaleur urbains.

Un indice de canopée nécessite l'identification d'arbres individuels. La détermination des arbres est aidée par différentes sources telles qu'un inventaire (géodatabase) des arbres d'une ville par des visites terrain ou de la photo-interprétation. La méthodologie tourne autour de l'analyse d'imagerie orientée-objet sur des données provenant du LiDAR (*Light detection and ranging*). En ayant des données sur la hauteur et le diamètre des arbres, il y a moyen d'obtenir une estimation de leur biomasse. Pour détecter les arbres, une des méthodes est d'utiliser les données LiDAR. Il faut normaliser le jeu de données en premier lieu. Pour ce faire, la hauteur de chaque point doit être extraite du niveau du terrain. Par la suite, un modèle numérique de surface (MNS) est dérivé des nuages de points pour créer la hauteur au-dessus du niveau du sol pour chaque pixel. Il faut ensuite ajouter un masque pour éliminer les bâtiments ainsi que les structures urbaines pour n'avoir qu'un modèle

numérique de canopée (MNC). Un masque pour enlever les végétations basses peut également être appliqué si nous voulons que les arbres d'une certaine hauteur comme ces derniers offrent plus de services et de charmes à un milieu urbain (Matasci *et al.*, 2018).

À la suite de ces manipulations, il faut segmenter la couronne des arbres et extraire leurs attributs à travers des algorithmes préalablement choisis. Les algorithmes sur le MNC filtré servent à trouver les maximums locaux qui représentent le haut des arbres. À partir de ces maximums locaux perçus, il a moyen de délimiter les segments représentant les arbres et extraire les informations les concernant telles que leur position, leur hauteur et la taille de leur couronne.



Figure 2. Exemple de carte des couronnes des arbres dans la ville de Vancouver tiré de Matasci *et al.* (2018)

Si nécessaire, il y a aussi moyen de distinguer le type d'arbres extraits entre conifères ou à feuilles caduques en se servant de la classification *Random Forest* (Figure 2, en vert pour conifères et en jaune pour caduques). Pour faciliter la délimitation des arbres, il faut les lier à des arbres de référence si disponible (Matasci *et al.*, 2018).

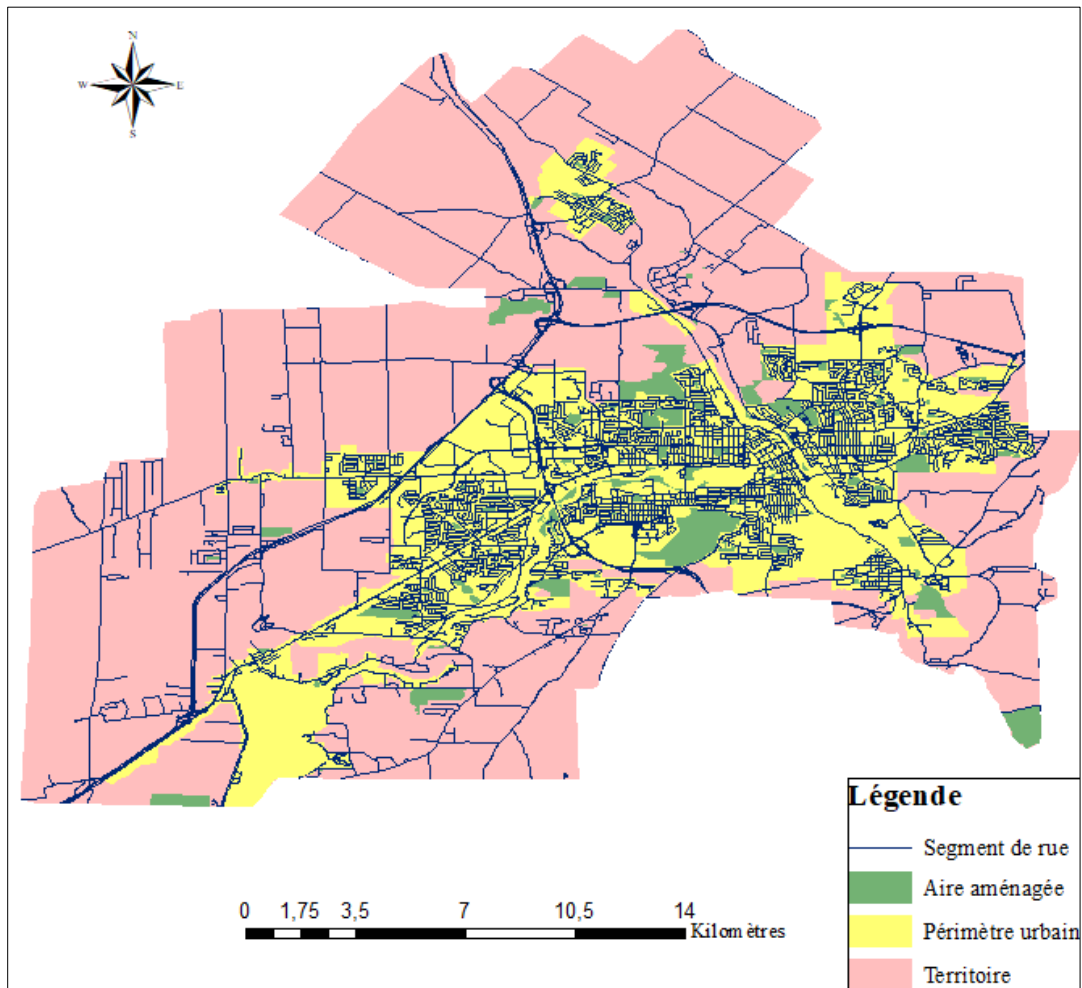
2.4.2. Application de cet indice pour Sherbrooke

L'indice de canopée a été utilisé dans la ville de Québec pour suivre l'évolution de l'état de sa couverture arborescente. Cet indice avait également pour objectif d'en faire une valeur de référence en date de l'année de l'étude (année 0). Ces résultats sont créés dans le but de prioriser des secteurs de plantation ainsi que de quantifier les efforts réalisés pour maintenir et bonifier leur couvert végétal (CERFO, 2015).

Grâce à l'indice de canopée produit pour la communauté métropolitaine de Montréal, nous savons que la canopée couvre 20 % de son territoire. Avec ces informations, il fut possible d'élaborer des objectifs pour le plan de développement durable de la collectivité montréalaise qui est de passer la canopée de 25 % en 2025 afin d'améliorer ses infrastructures vertes (Gendron-Bourchard, 2013). L'analyse permet aussi de cerner les zones du territoire en fonction du couvert forestier urbain dans lesquelles il faut prioriser la plantation d'arbres pour éviter les îlots de chaleur. Des études récentes ont également recensé que le territoire industriel montréalais avait un indice de canopée à 3 % et celui pour les aires occupées par les grands centres commerciaux est à 2 %. Pour réduire les îlots de chaleur urbains, il devrait avoir contribution du secteur privé dans l'implantation d'arbres (Ville de Montréal, 2019).

La pertinence d'appliquer cet indice sur la Ville de Sherbrooke est de connaître le taux de canopée présent dans les îlots de chaleur urbains donnant ainsi une précision sur les conditions environnementales avoisinantes. Il serait aussi avantageux de savoir le taux de canopée dans les milieux résidentiels hors des ICU afin d'avoir la différence du taux entre les deux milieux pour mieux calibrer les zones d'ICU. Augmenter la végétation urbaine dans ces zones pourrait être bénéfique pour les habitants, car il y aura une hausse d'évapotranspiration sur les surfaces de la ville qui diminuera la production de chaleur sensible qui affecte le bilan énergétique urbain (Parmentier, 2010). Par ailleurs, nous saurons le type d'affectation du sol en général dans les ICU avec le moins de canopées. Une modification pourrait s'ensuivre pour développer et adapter l'écosystème urbain en fonction d'une durabilité environnementale. À ma connaissance, il n'y a pas de cartes de cet indice pour la Ville de Sherbrooke.

3. Site d'étude

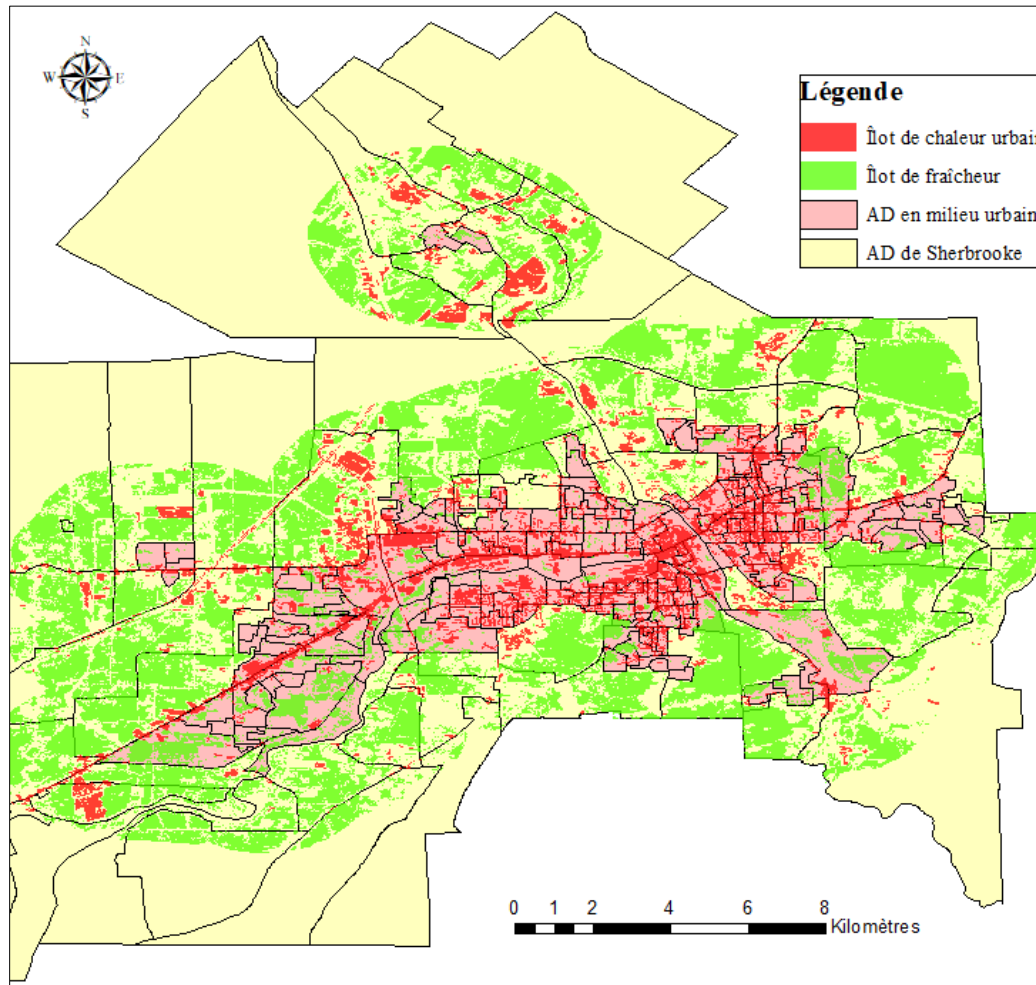


Auteure : Sophia Tran, 2019
Source : Données Québec

Figure 3. Site d'étude général (La Ville de Sherbrooke)

La Ville de Sherbrooke est au cœur de la région administrative de l'Erie et sa superficie fait 366 km² ce qui représente moins de 4 % du territoire de la région. En revanche, 50 % des Estriens y vivent (Enviro-accès, 2013). En date du 1^{er} janvier 2019, Sherbrooke (Figure 3) est composée de 165 937 personnes (Ville de Sherbrooke, 2019). Elle possède donc la plus forte densité de population en Erie, soit plus de 400 habitants par km². De plus, le pourcentage de la population vivant en milieu urbain est le plus élevé dans la région avec 91,3 %. La Ville de Sherbrooke est considérée comme une MRC depuis 2002, une des six constituant l'Erie. L'ensemble de six arrondissements forme le territoire : Brompton, Fleurimont, Jacques-Cartier, Lennoxville, Mont-Bellevue et Rock Forest – Saint-Élie –

Deauville. Un tiers du territoire est composé de zones agricoles malgré sa forte densité et son milieu urbanisé. L'autre tiers est voué aux zones rurales et le dernier tiers provient du périmètre urbain (Figure 4). Ce périmètre urbain est une cohabitation entre des zones résidentielles, commerciales, industrielles et de zones vertes. On y trouve plus de 108 parcs et espaces verts. Le territoire de la Ville de Sherbrooke est composé de différents types de zonages et se recoupe en 8 entités (Enviro-accès, 2013).



Auteure : Sophia Tran, 2019
Source : Données Québec, Statistique Canada, INSPQ

Figure 4. Zone d'étude précise de l'essai, 2016 (Périmètre urbain)

Selon l'Institut de la statistique du Québec, Sherbrooke avait une population de 157 260 habitants en 2012 (Enviro-accès, 2013). Il y a eu une croissance démographique de 5,23 % entre 2012 et 2019. Approximativement 10 160 personnes habitant Sherbrooke ne sont pas natales du Canada (immigrants et des résidents non permanents). En général, le Québec se

trouve dans une situation où la proportion des jeunes diminue et celle des individus plus âgés augmente. Ce cas ne fait pas exception à Sherbrooke. Sur le nombre total de la population de Sherbrooke en 2011, environ 16 % de la population avait 65 ans et plus (estimation de 25 089 personnes) alors que les jeunes entre 0 à 17 ans équivalaient à 19 %. Une personne sur quatre dans l'arrondissement de Jacques-Cartier est âgée de 65 ans et plus (Sage-Innovation, 2015) et nous savons que cette classe d'individus est la plus vulnérable à la chaleur (Huang *et al.*, 2011). Une attention particulière devrait ainsi être apportée pour certains arrondissements en temps de canicule.

Pour le portrait socio-économique, en 2012, on retrace 65 995 ménages sur le territoire de la MRC de Sherbrooke ce qui équivaut à une augmentation de 16,8 % depuis 1996. 16,3 % de la population sherbrookoise vit seul dans leur logement tandis qu'à peu près 67,7 % des personnes vivant en Estrie est propriétaire de leur résidence. Le revenu moyen des ménages tourne autour de 52 137 \$ par année. Pour le revenu médian, il s'établit à 41 229 \$ par année. Ces chiffres sont inférieurs aux moyennes de l'ensemble du Québec. Le taux des personnes à faible revenu dans les ménages constitue 18,4 % de la population. Pour les ménages qui nécessitent de l'aide sociale et de la solidarité sociale pour subvenir à leurs besoins, les taux sont de 5,7 % et 4,0 % respectivement (Enviro-accès, 2013).

4. Données

4.1. Données pour le portrait

Les données (Tableau 1) pour le portrait sont celles du recensement de 2016. La raison de ce choix est que l'année 2016 est l'année la plus proche des données utilisées pour faire l'indice de canopée urbain dans le cadre de ce travail. Ces données (MNT, MNS) proviennent de l'année 2015 (MERN, 2015). De plus, le recensement de 2016 est un questionnaire long et obligatoire comparé à celui de 2011 qui est un formulaire volontaire ce qui en fait un portrait plus juste de la population du Canada (Coulombe, 2016). La carte d'ICU représente des prédictions de la température relative de surface divisées en 9 niveaux de la fraîcheur à la chaleur grâce à des images satellites prises entre 2005 et 2011. Ces prédictions sont vraisemblablement d'actualité en 2016. Les aires de diffusion (AD) représentant entre 400 et 700 personnes (Statistique Canada, 2019b) sont la meilleure échelle d'analyse pour étudier les populations en présence d'ICU. Les aires de diffusion agrégées (ADA) regroupant entre 5 000 et 15 000 individus (Statistique Canada, 2019a) deviennent une échelle d'étude trop large, car il n'est plus possible de repérer les patrons socio-économiques dans nos données d'ICU.

Pour un portrait, il faut également la carte des îlots de chaleur urbains mentionnée plus haut faite par le CERFO. Les classes 8 et 9 de la carte vont être utilisées pour représenter les ICU de Sherbrooke puisqu'elles sont considérées comme les températures les plus chaudes tandis que les classes 1 et 2 vont représenter les îlots de fraîcheur urbains (IFU) (CERFO, 2013a). Les données des îlots étaient en format matriciel et en les changeant en format vectoriel, la forme des îlots a été modifiée en une version simplifiée qui diffère un peu en débordant ou en étant réduite des formes originales (Figure 5). L'impact de cette modification sera négligeable sur les résultats.

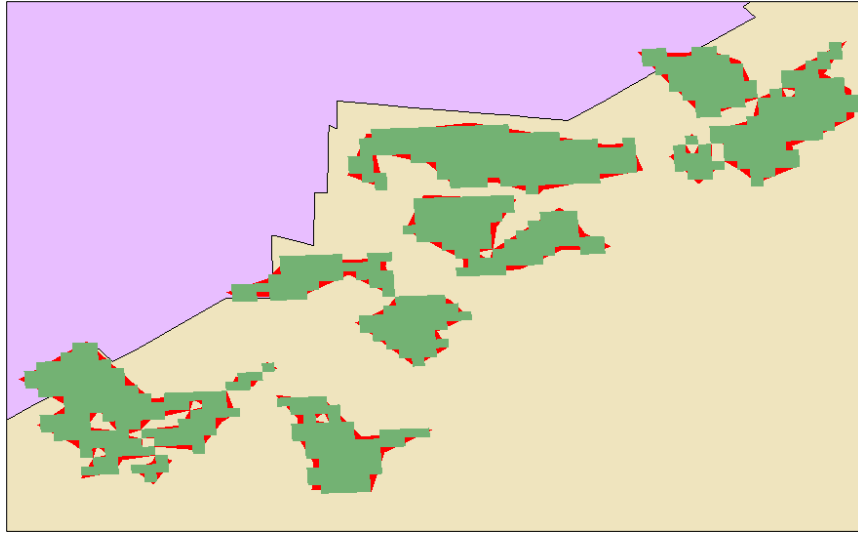


Figure 5. Exemple de la différence entre les formats vectoriel en rouge et matriciel en vert de la classe 9 des données d'îlots de température

4.2. Données pour l'indice de canopée urbain

Pour faire l'indice de canopée urbain, un modèle numérique de surface (MNS) et un modèle numérique de terrain (MNT) vont être utilisés. Le MNS et le MNT (Tableau 1) sont dérivés des données LiDAR. Ils ont été créés par le Groupe Géospatial Québec. Ce projet de levés LiDAR, de classification de données et de production de MNS, de MNT et de courbes de niveau pour le territoire de Sherbrooke et de son aéroport a été mandaté par le Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles. Les données LiDAR de Sherbrooke ont été prises en mai 2015 (MERN, 2015). Par conséquent, les données de MNS et de MNT sont plus récentes que la carte d'ICU, mais se rapprochent du recensement des données socio-économiques.

Les logiciels utilisés par la firme mandatée sont ALS Post Processing en ce qui concerne le prétraitement et la calibration des données LiDAR tandis que pour la classification et la production des livrables (modèles numériques), le logiciel MicroStation et les applications TerraScan/TerraModeler ont été employés (MERN, 2015). Le MNS et le MNT sont des modèles numériques d'élévation. Ces fichiers contiennent les données d'altitude d'un site d'étude qui sont sous forme de semis de points irréguliers ou de maillage. Le MNS représente le relief et le sursol, soit le sommet des arbres et l'élévation des bâtiments, d'un territoire. Le MNT, quant à lui, équivaut à l'élévation du terrain naturel. Le MNS est utilisé dans la gestion forestière, l'urbanisme et la télécommunication et le MNT en topographie,

hydrologie, géologie et archéologie (Altoa, 2019; Doungmo, 2017). Ces MNE ont été produits par la transformation de différentes sélections des points LiDAR classés. Ces points ont généré un réseau triangulaire irrégulier (TIN) qui a été converti en grid (MERN, 2015).

Des couches vectorielles du cadre bâti de Sherbrooke vont être utilisées pour éliminer les éléments indésirables du MNS normalisé tels que les bâtiments puisque ces derniers affectent le calcul de l'indice de canopée urbain. De plus, même en supprimant les pixels en bas d'une certaine altitude, ces structures peuvent être encore présentes dans le MNE, car certains immeubles sont hauts. Il faut donc trouver un moyen d'enlever ces pixels ne représentant pas la canopée urbaine de Sherbrooke.

4.3. Données pour priorisation des AD lors des canicules

Les données (Tableau 1) utilisées pour créer une carte des lieux à prioriser lors des situations d'urgence pendant les canicules sont les résultats des deux objectifs secondaires précédents. Ces résultats vont être les critères pour une analyse afin d'identifier les zones à intervenir en premier lieu.

Tableau 1. Récapitulatif des données de l'essai

Donnée	Source	Année	Format	Résolution/échelle
MNS	Université de Sherbrooke	2015	.tif	1 m
MNT		2015	.tif	1 m
Données socio-économiques	Statistique Canada	2016	.itv	AD
Limites des aires de diffusion		2016	.shp	-
Périmètre urbain	Données Québec	2019 (Diffusion initiale)	.shp	-
Données de la prédiction des températures de surface	INSPQ	2013 (Diffusion initiale)	.tif	20 m
Mosaïque d'images de Sherbrooke	Université de Sherbrooke	2013	.tif ou .ecw	10 cm
Bâtiments		-	.shp	-
Ponts		-	.shp	-

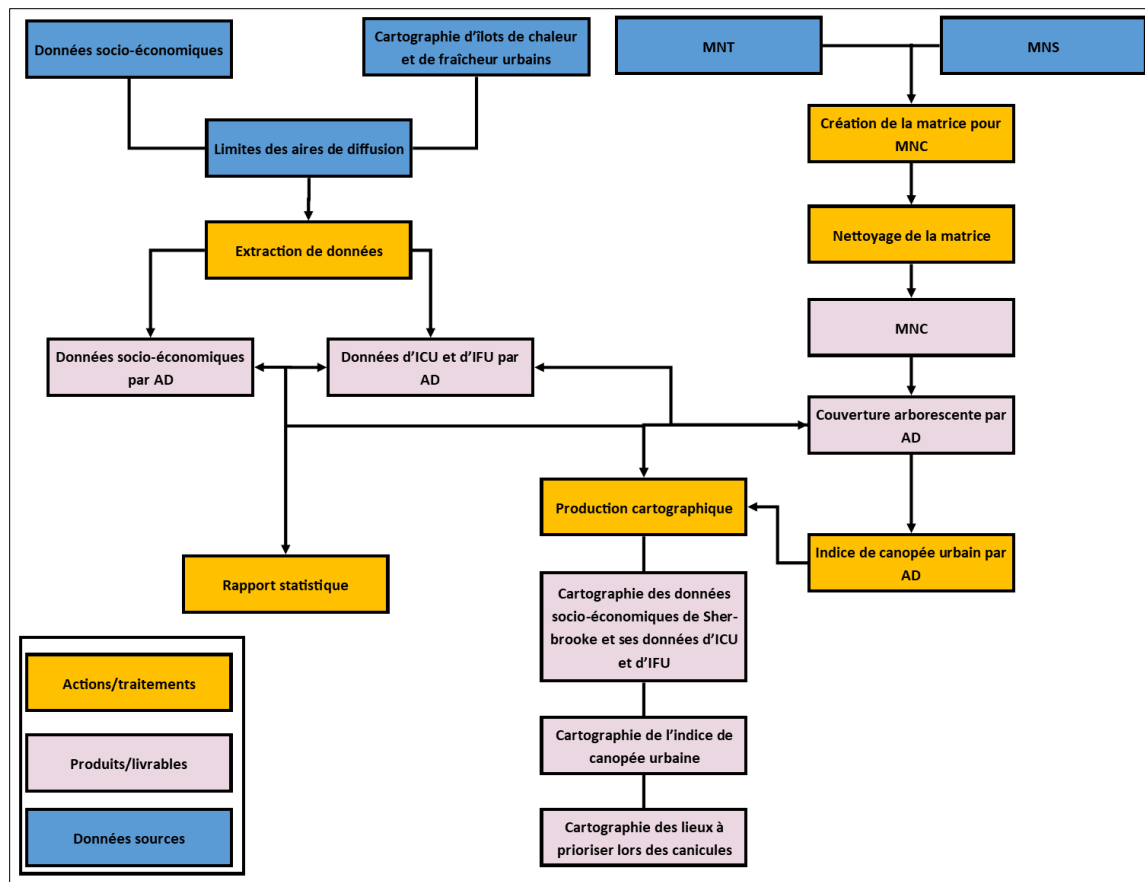


Figure 6. Organigramme méthodologique

5. Méthodologie

5.1. Portrait socio-économique

L'approche méthodologique de cet essai est présentée dans la Figure 6. La méthodologie se décompose essentiellement en 2 parties : l'analyse des données du recensement pour déterminer le profil socio-économique des populations et le calcul de l'indice de canopée urbaine. Avec ces deux parties, l'identification des zones à prioriser dans Sherbrooke lors des canicules va être extraite.

Le portrait se fait simplement grâce à de l'analyse spatiale et statistique des données socio-économiques et géospatiales avec un système d'information géographique (SIG) tel que ArcGIS ou QGIS ainsi que des programmes de manipulation des données comme Excel. Les données socio-économiques doivent être nettoyées pour ne garder que celles pertinentes dans la Ville de Sherbrooke à une échelle géographique convenable pour les

mettre en relation avec les ICU ainsi que les variables établies pour analyser s'il y a de l'injustice environnementale. Le logiciel Beyond 20/20 a été utilisé pour lire les données de Statistiques Canada et les opérer tandis que l'échelle des données est celle des aires de diffusion mentionnées plus haut.

L'idée du portrait de Sherbrooke est d'en résulter des statistiques (coefficients de variation et de détermination) entre les informations socio-économiques de la population et la concentration d'îlots de chaleur urbains dans les AD afin de voir si les indicateurs socio-économiques contribuent aux variations d'ICU des AD. Les calculs des statistiques, soit R^2 et F-Test sont faits sur Excel à travers les outils dédiés à ces variables. La concentration en IFU des AD va également être utilisée pour pousser l'analyse des indicateurs socio-économiques. Il faut prendre en considération qu'une densité de population et de logements amène une variation sur la superficie des îlots d'un AD à un autre ce qui nécessite l'intégration des informations relatives au bâti résidentiel dans l'analyse. Il y a 249 AD dans la Ville de Sherbrooke, 189 AD se trouvent complètement dans le périmètre urbain établi par la Ville de Sherbrooke (Données Québec, 2019). Les aires de diffusion se retrouvant partiellement dans les limites urbaines ne sont pas considérées comme des AD urbaines afin de faciliter l'analyse. Ces 189 AD vont être notre espace d'étude.

Chaque îlot et AD possèdent une superficie qui peut être générée d'un SIG et de leur shapefile respectif. Il faut fusionner et unir les îlots qui correspondent à ceux de chaleur ou de fraîcheur pour que leur superficie ne soit pas en double s'ils se superposent comme ils sont divisés en deux classes chacun. Avoir le pourcentage d'ICU ou d'IFU dans un AD se fait avec une formule de produit croisé, c'est-à-dire l'aire de l'îlot multipliée par 100 divisée par l'aire totale de l'AD, à la suite de la transformation des tableaux tabulaires des shapefiles en format compatible pour les manipuler sur Excel. Cette superficie a également été utilisée pour calculer la densité de la population, des logements et des ménages pour chaque aire de diffusion.

Pour les données socio-économiques, le choix des paramètres provient d'une recherche élaborée par Pham *et al.* (2010). Les variables socio-économiques pour l'étude nommée sont l'âge de la population, le nombre de population, de logements et de ménages, le loyer, le type d'habitation et le revenu. Le loyer est une donnée sensible dont son accès n'est pas

disponible. Il ne serait pas possible de l'intégrer dans l'analyse. Cela affectera minimalement l'interprétation des résultats. Les données socio-économiques et relatives au bâti résidentiel par AD de 2016 prises sur Statistiques Canada sont nettoyées pour ne garder que celles nommées ci-haut et elles ont été jointes à la couche représentant les AD dans ArcGIS afin d'en faire des cartes thématiques. Les analyses statistiques ont été faites sur Excel (Tableaux 4 et 5). Un faible revenu représente en 2015 pour un ménage à une personne après impôts à 22 460 \$. Le montant est ajusté en fonction de la taille du ménage. Il faut multiplier le montant par la racine carrée de la taille du ménage ce qui est un ajustement à la hausse. Si le revenu après impôts est inférieur au seuil déterminé, les personnes de ce ménage privé sont considérées comme à faible revenu (Statistique Canada, 2017).

5.2. Indice de canopée urbain

L'indice de canopée urbain a été choisi pour l'essai, car il permet d'avoir un aperçu du couvert arborescent dans chaque AD urbaine de Sherbrooke ainsi que dans les îlots de chaleur ou de fraîcheur urbains. Nous savons que la végétation a un rôle pour la régularisation des températures en ville. Pour obtenir l'indice, il faut avoir une couche contenant que la canopée urbaine de Sherbrooke. Cette couche a été développée au fur et à mesure des manipulations des données accessibles. De cette manière, nous pouvons analyser la relation entre les facteurs environnementaux et socio-économiques. Il y a moyen également de comparer la quantité de végétation à celle d'ICU ou d'IFU pour chaque AD dans la section de discussions et d'interprétations des résultats. Cet indice a été utilisé à plusieurs reprises par les municipalités au Québec dont Montréal et Québec. Une méthode simple est donc développée dans ce présent essai pour les données LiDAR afin d'avoir les mêmes résultats et avoir une compréhension de la couverture arborescente de Sherbrooke. L'indice de canopée urbaine est exploité par les municipalités ce qui en donne crédit.

Le choix du LiDAR pour cette étude est dû au fait que ces données sont récentes et plusieurs recherches proposent son utilisation. Les études de CERFO (2015) et Filiatreault (2015) en font mention. Ces jeux de données représentent une visualisation numérique 3D de la réalité. L'analyse de la couverture arborescente de la Ville de Sherbrooke pourrait

être plus pointue comme chaque point LiDAR aide à modéliser les structures de l'environnement tandis que le NDVI qui a aidé à élaborer la carte d'ICU s'est fait à partir d'images aériennes (2D). Plusieurs projets (Communauté métropolitaine de Montréal, 2017; CERFO, 2015) font leur indice à partir du NDVI.

Les paramètres principaux sont la taille de la couronne des arbres ainsi que la hauteur des arbres. La taille de leur couronne offre un moyen de démontrer la superficie de l'arbre. La hauteur de la végétation aide à déterminer ou distinguer l'arbre d'un arbuste. L'autre paramètre est le couvert arborescent sur la superficie totale des îlots de chaleur urbains par aire de diffusion en pourcentage, soit l'indice de canopée urbain même. La forme est également un paramètre afin d'avoir une couche représentant la canopée pour la création de l'indice. La superficie est un paramètre au calcul de l'indice puisque ce dernier se base principalement sur ce paramètre. Finalement, la pondération de l'indice de canopée urbaine revient au pourcentage de canopée par AD par rapport à leur superficie totale.

Le MNS et le MNT dérivés d'un jeu de données LiDAR de 2015 vont être utilisés pour réaliser un indice de canopée urbain de Sherbrooke. Il faut soustraire le MNS par le MNT et ainsi avoir un modèle numérique de canopée (MNC) ou un MNS normalisé. Cependant, les bâtiments sont à prendre en considération durant les manipulations, car ils sont présents dans les modèles numériques. Un MNC est une représentation de l'élévation ou la hauteur de la canopée (Altoa, 2019; Doungmo, 2017). Pour le nettoyage, les bâtiments de Sherbrooke en format vectoriel sont utilisés. Cette donnée a été numérisée par plusieurs personnes et selon plusieurs années. Les ponts sont aussi en couche vectorielle et proviennent de l'Université de Sherbrooke afin d'éliminer leur présence dans le MNC. Ce fichier de structures en élévation est récent, car les structures les plus récentes ont été ajoutées en 2018.

En premier lieu, il faut soustraire les MNS de Sherbrooke par ces MNT à travers un SIG. L'exercice est fait sur ArcGIS par l'outil Raster Calculator (Figure 7) puisque les données sont en format matriciel. Le MNT de Sherbrooke est divisé en neuf couches matricielles. Il faut les fusionner pour avoir une seule couche afin de la soustraire. Les MNS de Sherbrooke doivent également subir la même manipulation avant toutes autres opérations.

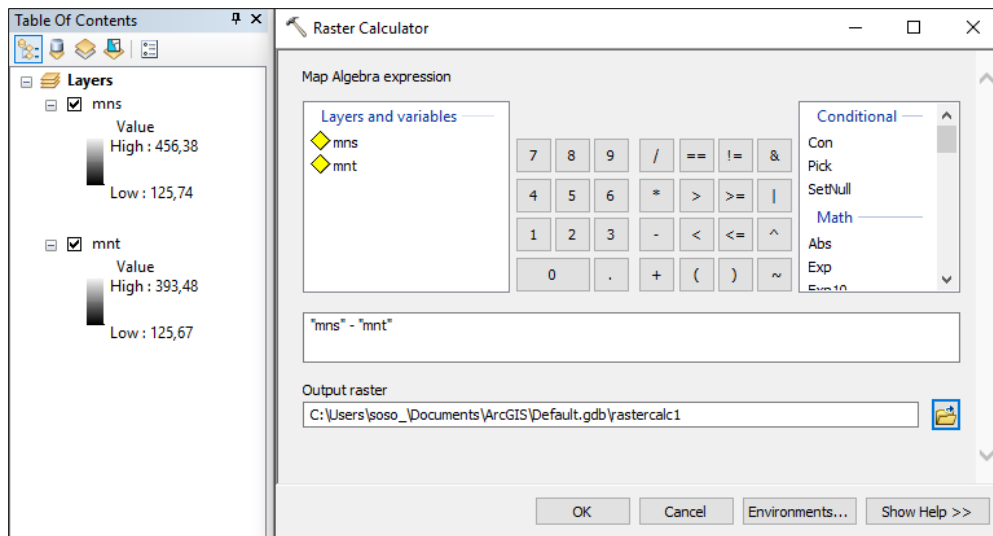


Figure 7. Formule dans Raster Calculator sur ArcGIS

Par la suite, le MNS normalisé (valeurs vont de -2,33 à 61,03) a été découpé avec les limites des AD qui se trouvent complètement en milieu urbain pour ne garder qu'un modèle numérique d'élévation plus restreint. Pour obtenir qu'une couche contenant les polygones représentant le couvert arborescent de la Ville de Sherbrooke, il faut discriminer le cadre bâti. Initialement, tous pixels en bas de 8 ont été éliminés en leur attribuant la valeur NoData puisqu'un arbre se définit par sa hauteur et celle-ci doit être plus de 7 mètres. Un arbuste est une plante en bas de 7 mètres et sa couronne n'est pas bien délimitée (Becker *et al.*, 1982). Une canopée est le couvert végétal créé par les arbres dans un territoire donné (Montréal, 2019). L'outil SetNull d'ArcGIS a été utilisé pour cette opération. Comme certains bâtiments du cadre bâti sont élevés, ils se retrouvent dans le MNS normalisé de plus de 7 mètres. Il faut pouvoir les éliminer. La manière choisie pour cet exercice est de prendre les couches vectorielles représentant les structures bâties telles que les ponts et les bâtiments, et d'effacer ces pixels du raster.

Les couches vectorielles proviennent de la Bibliothèque du Frère-Théode de l'Université de Sherbrooke. Les ponts sont en polyligne et ont été transformés en polygone avant de les fusionner aux polygones correspondant aux bâtiments sous forme de masque (couche des AD en milieu urbain moins les polygones de ponts et de bâtiments). Cependant, les structures en format vectoriel ne se superposent pas complètement sur les pixels ce qui fait en sorte qu'ils ne sont pas effacés (pixel disparate dans le raster et isolé). Un « *buffer* » de

0,00001 degré décimal a été ajouté autour des structures qui équivaut à approximativement 1 m dans un système MTM classique. Il faut remarquer que certains pixels des arbres à proximité pourraient être effacés et qu'il y a certains pixels de structures résiduels. Il faut aussi éliminer les ponts puisqu'ils sont au-dessus des cours d'eau faisant en sorte qu'ils sont présents par leur élévation dans le MNE calculé. À la suite de ces opérations, le MNS normalisé est nettoyé pour n'être qu'un MNC (découpage). Les bâtiments restants ont été éliminés manuellement puisque la couche des structures ne date pas de la même année que les produits du LiDAR ce qui fait que certains bâtiments neufs ne sont pas effacés. Leurs formes spécifiques ont permis de les distinguer du couvert végétal en ayant un contour linéaire et une carte de fond (*Basemap*) a été ajoutée comme référence. De plus, les pixels des structures sont généralement de la même valeur/couleur (Figure 8). L'élimination manuelle a été faite par AD pour un total de 189 AD, soit les AD du périmètre urbain. En outre, 145 entités du cadre bâti manuellement numérisées ont été supprimées. Le MNC nettoyé n'est pas parfait puisqu'il y a des restants de pixels d'autres retours tels que les câbles électriques de plus de 7 mètres, mais donne un aperçu primaire du couvert des arbres de Sherbrooke.

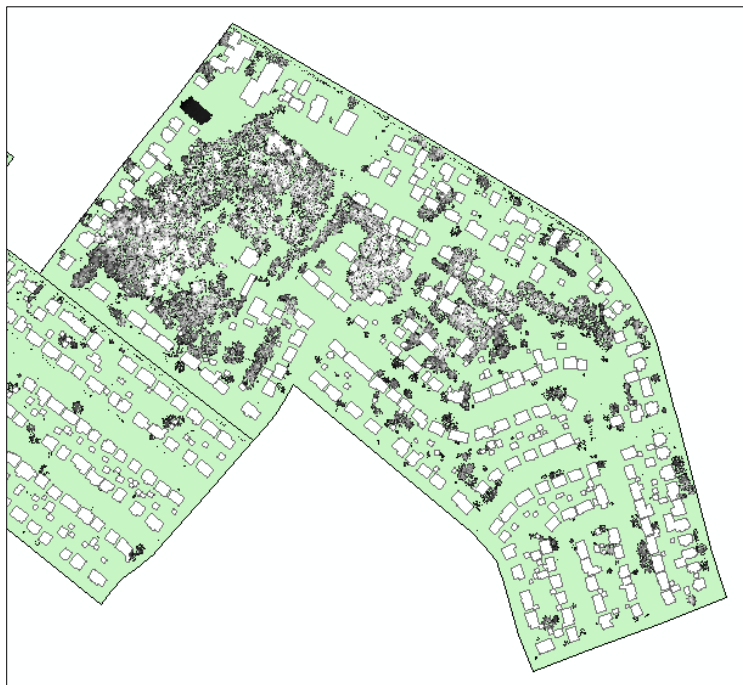


Figure 8. Exemple de MNS normalisé de plus de 7 mètres découpé avec le masque de structures (Exemple de bâtiment restant, en noir uniforme)

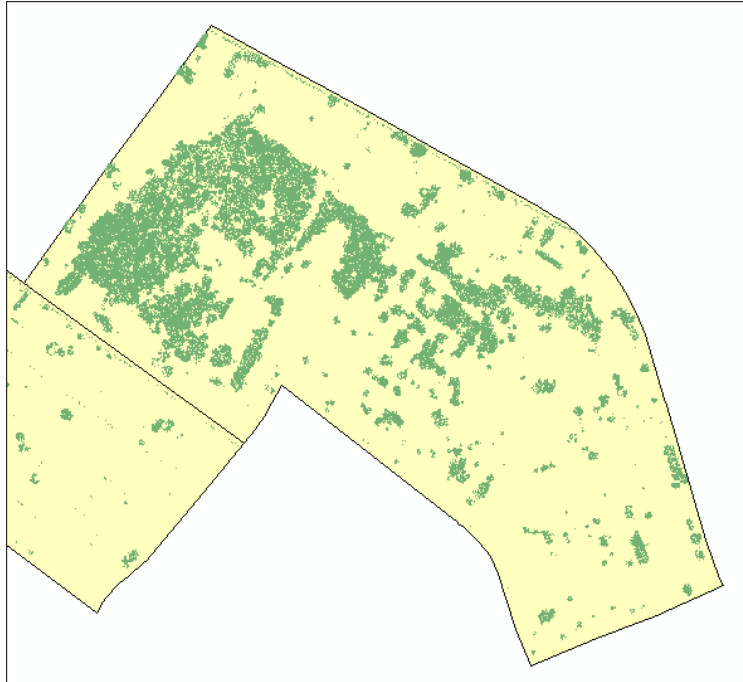


Figure 9. Exemple de la couche de canopée sur la couche des AD

Une couche contenant uniquement les arbres a été créée et mise sous forme vectorielle. Les polygones d'arbres ont été divisés par AD (Figure 9) et leur superficie a été calculée afin de produire l'indice de canopée urbaine de chaque AD pour Sherbrooke. Il y a aussi moyen avec la couche des arbres de calculer l'indice de canopée dans les îlots de chaleur ou de fraîcheur contenus dans chaque AD. Il faut découper les couches différemment ainsi les aires totales des entités changent. S'il le faut, pour avoir les îlots de chaleur ou de fraîcheur urbains par AD, il faut découper la couche de la fusion des îlots urbains de chaque type avec la couche des limites de chaque AD. Cela nous permet d'avoir un ensemble d'ICU ou d'IFU pour chacune des 189 AD qui représente la superficie totale sur laquelle diviser la superficie de canopée. Finalement, l'indice de canopée urbaine a été calculé selon une formule équation de produit croisé qui donne un résultat en pourcentage. La formule est la suivante :

$$\text{Indice de canopée urbaine} = \frac{\text{superficie de la canopée par AD}}{\text{superficie totale de l'AD}} * 100$$

5.3. Identifier les lieux à prioriser

Le choix des critères pour définir un lieu à risque lors d'une période de canicules dans notre étude se base sur l'étude du CERFO (2013b). L'identification des zones à prioriser lors d'une canicule ou d'une vague de chaleur se fait grâce à une analyse multicritère. Cette méthode permet l'aide à la décision auprès des acteurs en gestion et planification urbaine puisqu'elle indique où les risques se situent dans la ville pendant les périodes de chaleur importante. Les premiers intervenants pourraient déjà être proches de ces zones pour de la sensibilisation sinon d'autres études pourraient être entamées pour analyser la distance et le temps de déplacement des services d'urgence à un lieu de secours.

Le choix d'une analyse multicritère par pondération permet d'intégrer les différents éléments déjà établis dans l'essai et en faire un outil dans un processus à la décision afin de résoudre des problèmes spécifiques. Les facteurs sociaux, économiques et environnementaux sont consolidés dans cette analyse. Le résultat dépend des pondérations et des classements faits sur les composantes choisies. L'analyse est simple puisque les différents critères ont déjà la même unité d'où le choix de cette méthode et un développement facile grâce à la littérature. Jusqu'à présent, les critères sont indépendants l'un de l'autre. En les mettant ensemble, des résultats interprétables sont extractibles.

Les différents paramètres pour considérer un lieu d'îlots comme un lieu d'intervention prioritaire sont les pourcentages du couvert végétal ainsi que les facteurs socio-économiques. Ces derniers choisis par la littérature sont ceux déjà mentionnés dans l'essai, soit, l'âge (15 ans et moins, 65 ans et plus) et le revenu. Le taux d'îlots de chaleurs urbains va également être pris pour trouver les lieux à prioriser lors des canicules. Le type de logement n'est pas pris en considération comme les appartements de plus de 5 étages qui sont un risque à la santé pour ces logeurs ne représentent que 2,68 % de tous les types de logements de Sherbrooke. Les endroits où se trouve ce type d'appartement devraient être pris en compte pour les premières interventions lors des canicules.

Pour chaque paramètre, une pondération y est rattachée (Tableau 2) pour une somme totale (toutes les pondérations) qui équivaut à 1. L'indice de canopée doit être inversé, car tous les autres paramètres dégradent la qualité des habitants sherbrookoïses. Ce pourcentage inversé indique le taux de l'AD non couvert par la canopée qui nuit et intensifie les

problèmes de chaleur en ville. Plus on s'approche de 1, plus l'AD devrait avoir une intervention immédiate pendant un événement d'extrême chaleur. Une valeur proche de 0 exprime que cet AD n'est pas une priorité lors des opérations de protection lors de chaleur extrême puisque la présence d'ICU, de personnes vulnérables et de limites financières y est basse, et un couvert arborescent relativement considérable s'y trouve.

La méthode est basée sur l'analyse de priorisation du CERFO (2013b) de son niveau de risque synthèse. Il y a eu un changement dans les pondérations. Le poids accordé pour la santé de 60 % du CERFO a été, dans ce travail, associé à l'âge des individus et il y a deux catégories d'âge vulnérables aux canicules. Alors, chacune d'elles a un poids de 30 %. Le poids de l'environnement qui était à 20 % a également été modifié puisqu'il y a aussi deux jeux de données, soit les couvertures arborescentes et d'ICU. Les ICU sont corrélés avec la couverture arborescente, mais les données exploitées y sont différentes ainsi que l'information produite. Le poids a été divisé en deux pour une pondération de 10 % chacune. Le poids lié à l'économie reste le même et équivaut à 20 %. Le tout fait 100 % ou 1 en le divisant par 100. L'emphase des pondérations est sur les personnes plus jeunes et âgées, soit la population vulnérable face aux vagues de chaleur, car en excluant les individus, la situation de priorisation serait obsolète. À la différence de ce travail, la recherche du CERFO (2013b) possède plusieurs sous-ensembles pondérés pour englober chaque catégorie, soit la santé, l'économie et l'environnement. Ce travail reste sur un seul niveau, car seuls les pourcentages des indicateurs socio-économiques de chaque AD sont utilisés pour représenter les catégories pondérées.

Tableau 2. Pondération pour l'analyse multicritère de priorisation

Paramètre (%)	Pondération
Personne âgée de 65 et plus	0,3
Personne âgée de 15 et moins	0,3
Couverture arborescente	0,1
Couverture d'ICU	0,1
Ménage à faible revenu	0,2

Des hotspots trouvés à partir des seuils établis sur les données socio-économiques, environnementales et des îlots de chaleur urbains auraient pu aussi être possibles. De cette

manière, les critères ne sont pas pondérés et les hotspots sont produits directement selon certains plafonds de valeurs tels que l'étude réalisée par Huang *et al.* (2011). Il existe différentes méthodes pour un résultat similaire.

Une classification des résultats finaux pondérés a été faite à travers la symbologie d'ArcGIS. 5 classes ont été créées comme dans l'étude du CERFO (2013) et une classe de données manquantes a été rajoutée puisque ce n'est pas tous les AD qui possédaient une donnée sur les ménages à faible revenu. Les classes ont été séparées par *Natural Breaks de Jenks*.

6. Résultats

Les résultats sont présentés selon les objectifs visés par cet essai, notamment la compréhension du profil socio-économique des populations présentes dans les ICU, la détermination de la structure végétale dans ces mêmes zones et l'identification des zones à prioriser en cas de chaleur accablante.

6.1. Cartographie des données socio-économiques dans les ICU de la zone étudiée

Les jeux de données de la superficie d'ICU et d'IFU couplées avec les données de Statistique Canada donnent un aperçu des caractéristiques socio-économiques et environnementales par AD pour la Ville de Sherbrooke.

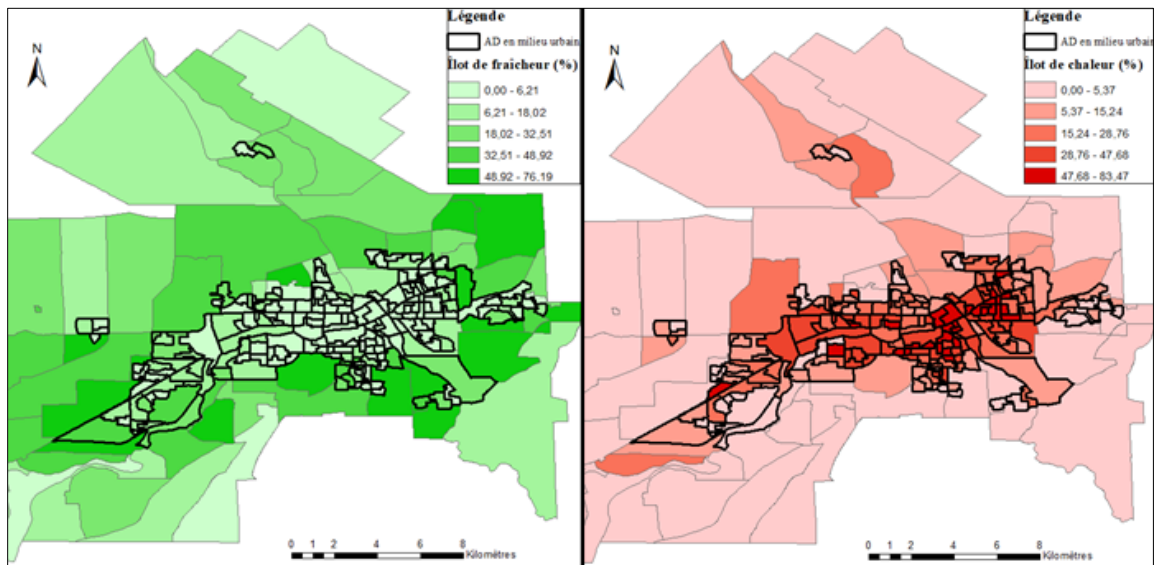
Tableau 3. Fréquence des AD selon les intervalles de pourcentage de la superficie des îlots de chaleur et de fraîcheur (aperçu primaire des AD et des îlots à l'intérieur de Sherbrooke)

Pourcentage de la superficie dans l'AD par les îlots	Nombre d'AD dans Sherbrooke		Nombre d'AD dans Sherbrooke en milieu urbain	
	Îlots de chaleur urbains	Îlots de fraîcheur urbains	Îlots de chaleur urbains	Îlots de fraîcheur urbains
0-25 %	162	202	103	175
25-50 %	59	32	58	13
50-75 %	26	14	26	1
75-100 %	2	1	2	0
Total	249		189	

Il y a au total 249 aires de diffusion pour la Ville de Sherbrooke. 28 d'entre elles ont plus de 50 % de leur superficie composée d'îlots de chaleur tandis qu'il y a 15 aires de diffusion avec des îlots de fraîcheur qui couvrent plus de 50 % de leur superficie (Tableau 3). 28 des

189 AD urbaines ont plus de 50 % de leur territoire en présence d'ICU et seulement une aire de diffusion possède un territoire avec plus de la moitié de sa superficie en îlot de fraîcheur.

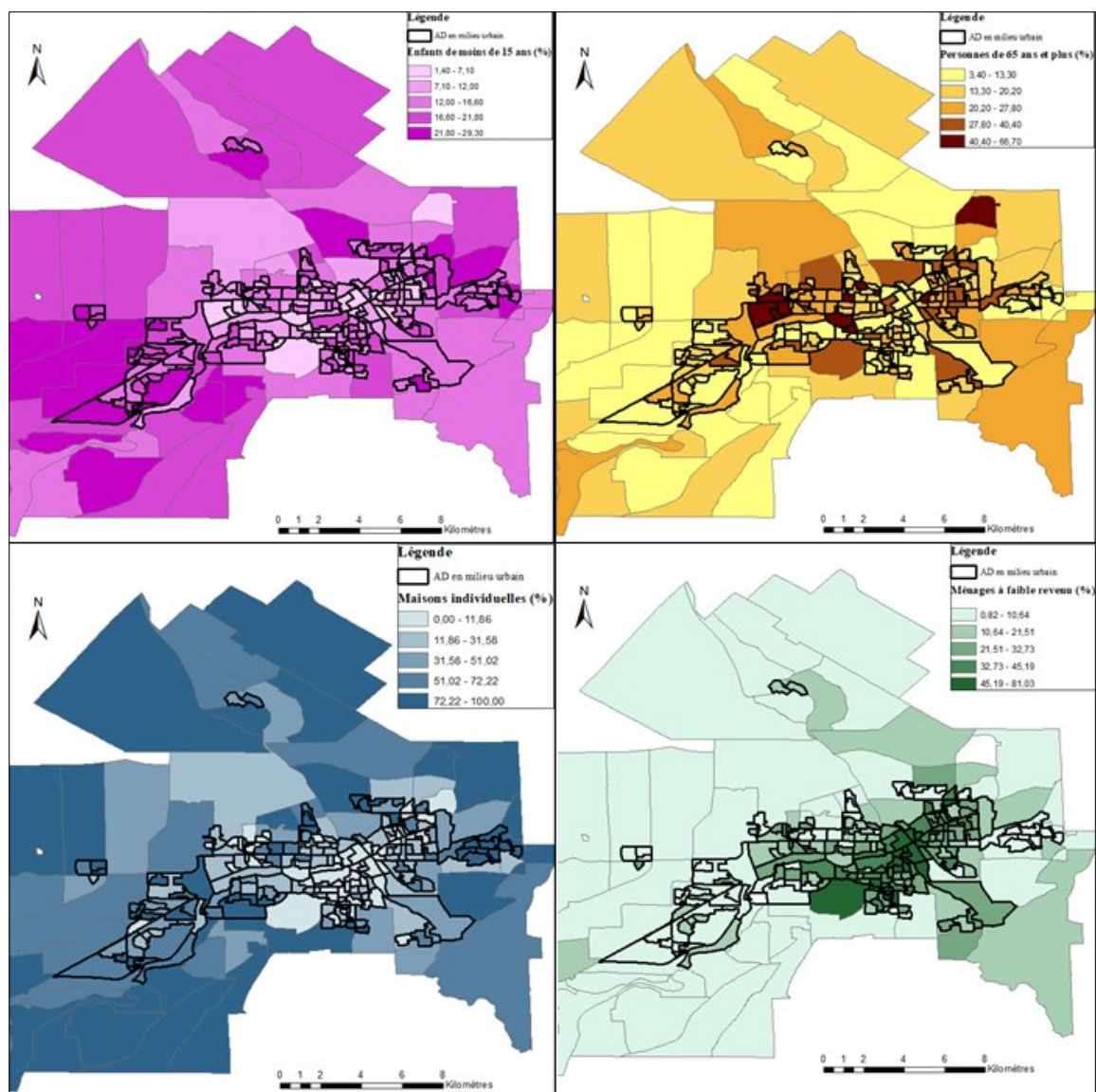
Les classes des cartes (Figures 10 et 11) ont été faites avec ArcGIS. La classification est celle de Natural Breaks de Jenks et elle est divisée en cinq classes.



Auteure : Sophia Tran, 2019
Source : Données Québec, Statistique Canada, INSPQ

Figure 10. Cartographie des pourcentages d'îlots de fraîcheur et de chaleur dans les aires de diffusion

La carte représente le taux d'îlots contenus dans chaque AD. Plus le taux est bas pour l'AD, moins la couleur est prononcée. La carte est centrée sur les AD en milieu urbain avec en arrière-plan une partie de Sherbrooke rural avec leur pourcentage respectif.



Auteure : Sophia Tran, 2019
Source : Données Québec, Statistique Canada

Figure 11. Cartographie des données socio-économiques de la zone étudiée

La Figure 11 correspond à la cartographie de différentes données socio-économiques pour la Ville de Sherbrooke. Les données sont par AD et sous forme de pourcentage. Les données socio-économiques sont l'âge (personnes de 15 ans et moins ainsi que celles de 65 ans et plus), les ménages à faible revenu et les maisons individuelles. Les intervalles d'âges choisis représentent les personnes généralement vulnérables par rapport aux canicules.

Tableau 4. Analyse des indicateurs de notre zone d'étude (Source : Statistique Canada, INSPQ)

Variables	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation
Enfants de moins de 15 ans (%)	14,75	5,54	0,38
Personnes de 65 ans et plus (%)	19,34	11,04	0,57
Personnes à faible revenu (%)	20,47	16,26	0,79
Loyer moyen brut (\$)	-	-	-
Locataires (%)	47,72	30,82	0,65
Maisons individuelles (%)	41,56	32,71	0,79
Maisons jumelées (%)	3,93	7,87	2,01
Maisons en rangées (%)	2,02	5,37	2,66
Appartements dans un duplex (%)	6,72	7,87	1,17
Appartements dans un immeuble de moins de cinq étages (%)	42,95	31,64	0,74
Appartements dans un immeuble de plus de cinq étages (%)	2,13	9,44	4,43
ICU (%)	21,28	19,32	0,91
IFU (%)	12,24	17,06	1,39

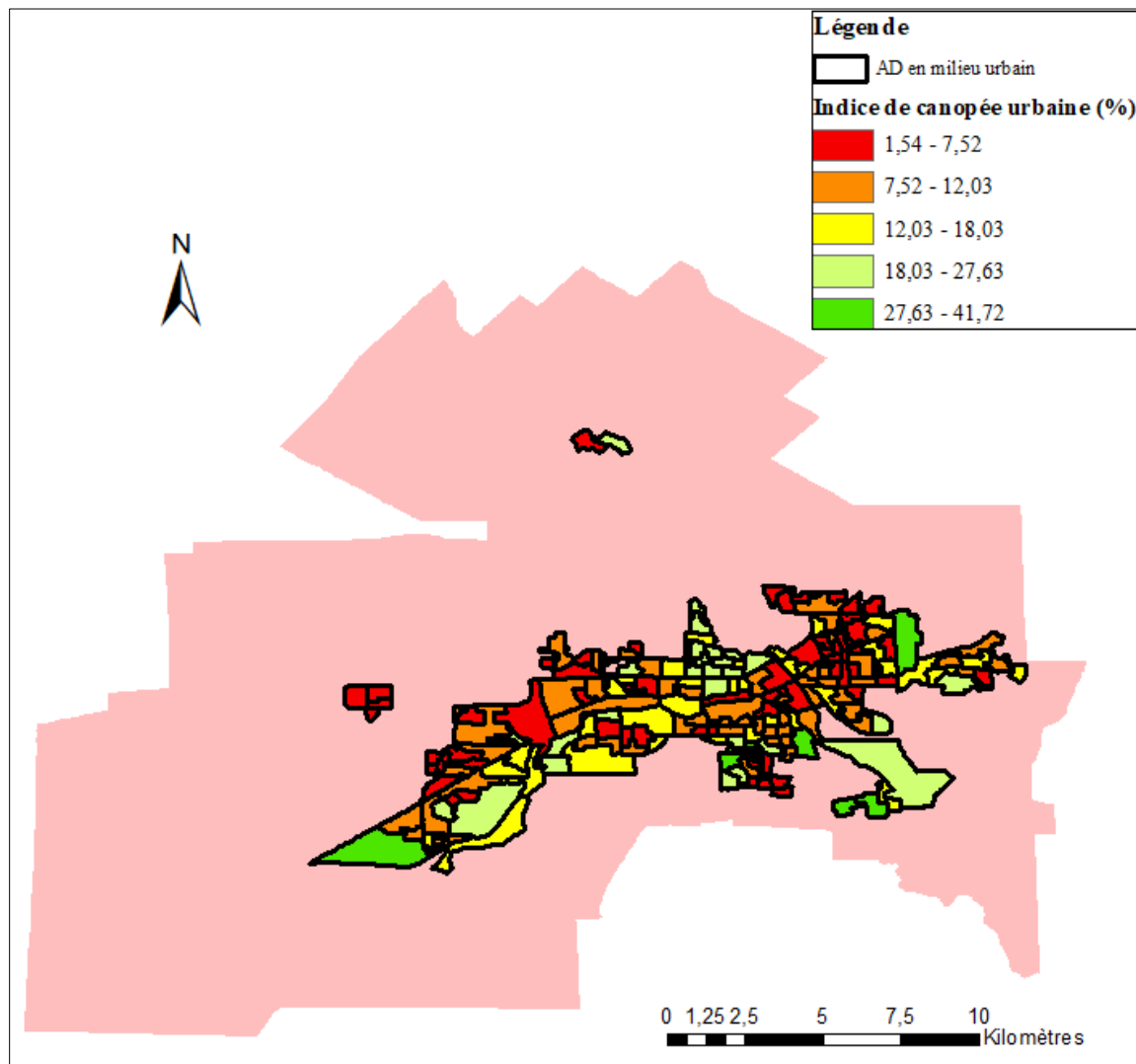
Tableau 5. Analyse entre les indicateurs socio-économiques et les concentrations d'îlots de notre zone d'étude par aire de diffusion (Source : Statistique Canada, INSPQ)

Variables	ICU		IFU		Valeur critique pour F (unilatéral)
	R ²	F-Test	R ²	F-Test	
Enfants de moins de 15 ans (%)	0,31	0,08	0,1188	0,11	0,81
Personnes de 65 ans et plus (%)	0,02	0,33	0,0267	0,42	
Personnes à faible revenu (%)	0,42	0,71	0,0844	0,91	
Loyer moyen brut (\$)	-	-	-	-	
Locataires (%)	0,36	0,39	0,06	0,31	
Maisons individuelles (%)	0,34	0,34	0,04	0,27	
Maisons jumelées (%)	0,17	6,02	0,0388	0,21	
Maisons en rangées (%)	0,08	12,93	0,0845	0,1	
Appartements dans un duplex (%)	0,17	6,02	0,0417	0,22	
Appartements dans un immeuble de moins de cinq étages (%)	0,3213	0,37	0,05	0,29	
Appartements dans un immeuble de plus de cinq étages (%)	0,24	4,19	0,0118	0,31	

Les données du Tableau 5 sont mises en relation avec les concentrations d'îlots de chaleur et de fraîcheur urbains afin de voir s'il y a une corrélation entre elles. Il y a deux variables pour cette analyse statistique, soit le coefficient de détermination R^2 et le F-Test. Le F-Test nous montre une comparaison entre deux variances.

6.2. Cartographie de l'indice de canopée urbaine pour la zone étudiée

L'indice de canopée urbaine représente la proportion d'arbres sur le territoire. Par cet indice, une réflexion sur l'aménagement du couvert arborescente pourrait être envisagée.



Auteure : Sophia Tran, 2019
Source : Université de Sherbrooke, Statistiques Canada

Figure 12. Cartographie de l'indice de canopée urbaine pour la zone étudiée (5 classes par Natural Breaks de Jenks)

À travers la carte (Figure 12), nous remarquons que plusieurs AD se trouvent en rouge ce qui indique un bas indice de canopée urbain pour ceux-ci. Les AD en vert qui ce dernier représente un taux élevé en canopée sont à la limite du milieu urbain.

La Ville de Sherbrooke a une moyenne d'indice de canopée dans son périmètre urbain de 12 %, c'est-à-dire que les AD de Sherbrooke disposent d'un indice moyen de 12 %. En comparaison, la moyenne de Montréal est de 20 % (Montréal, 2019). Une partie des AD de Sherbrooke se trouve avec un indice de canopée urbaine entre 5 et 10 % (Tableau 6). La moitié des AD a un indice de canopée urbaine inférieur à 10 %.

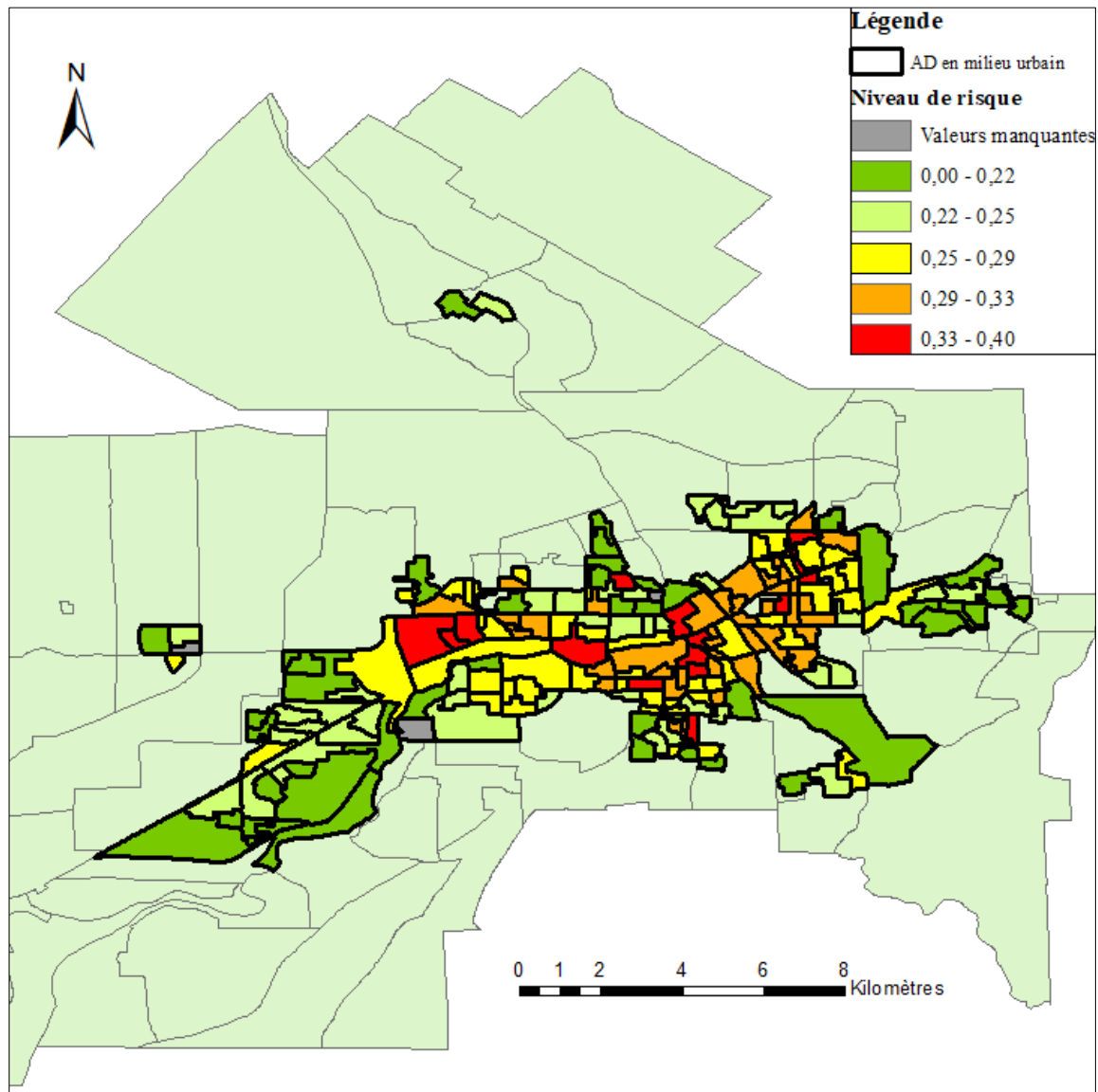
Tableau 6. Fréquence des AD selon les intervalles de pourcentage pour l'indice de canopée

Indice de canopée urbaine (%) en 9 classes	Nombre d'AD
0-5	18
5-10	79
10-15	50
15-20	15
20-25	15
25-30	5
30-35	2
35-40	2
40-45	3

L'indice de canopée urbaine est divisé en 9 classes allant de 0 à 45 % dans le Tableau 6. L'indice de canopée urbaine le plus haut sur les 189 AD est de 41,72 % et le plus bas est de 1,54 %.

6.3. Cartographie des lieux à prioriser pour la zone étudiée

La carte thématique réalisée (Figure 13) indique les lieux urbains où il faut intervenir en premier lieu lors d'une période de canicules grâce à une analyse multicritère faite sur les données socio-économiques et environnementales.



Auteure : Sophia Tran, 2019
Source : Données Québec, Statistique Canada, Université de Sherbrooke

Figure 13. Cartographie des lieux à prioriser pour la zone étudiée

La délimitation en vert en arrière-plan des AD urbains selon leur niveau de risque (Figure 13) est une partie des AD restants de Sherbrooke. Les zones en rouge sont celles qui faut sensibiliser et contacter avant et pendant les moments de températures extrêmes.

Il y en a 17 sur 189 AD. Les AD en gris indiquent qu'elles manquent une ou plusieurs données pour avoir un résultat.

Tableau 7. Valeurs des indicateurs socio-économiques des zones à risque (rouge)

AD	Pourcentage							Indice Priorisation
	ICU	IFU	Faible revenu	Maisons individuelles	Enfants de moins de 15 ans	Personnes de plus de 65 ans	Non couvert par la canopée	
24430019	57,93	0	40,26	8,16	10,00	25,00	94,02	0,34
24430020	21,73	0	81,03	0	29,30	3,40	95,10	0,38
24430021	42,42	0	65,79	0	13,30	16,00	97,11	0,36
24430023	67,06	0,53	62,81	2,35	8,30	23,10	96,15	0,38
24430032	71,91	0	29,63	23,4	13,80	25,30	94,40	0,34
24430034	64,05	0,24	41,96	5,19	3,60	49,10	90,24	0,40
24430041	79,57	0	65,38	0	5,70	19,50	95,16	0,38
24430043	49,31	0,54	38,93	3,49	6,90	32,20	90,21	0,33
24430049	24,50	2,61	16,25	7,69	3,90	64,80	80,18	0,34
24430064	30,15	4,23	16,88	0,94	4,40	56,00	94,66	0,34
24430066	42,79	10,66	11,21	17,33	4,30	55,00	90,79	0,33
24430136	42,82	0,23	37,89	10,71	7,00	38,00	90,92	0,34
24430154	44,28	1,09	69,15	1,92	18,60	22,50	86,15	0,39
24430155	58,71	0	60,16	3,9	13,30	12,50	92,95	0,35
24430167	20,40	1,78	13,08	5,68	3,80	65,60	85,23	0,34
24430220	16,08	3,35	18,06	15,05	2,80	66,70	91,57	0,35
24430270	44,85	0	60,83	3,03	17,40	9,90	97,50	0,35
Moyenne	45,8	1,49	42,9	6,4	9,79	34,39	92	0,36

Source : Statistique Canada, INSPQ, Données Québec

7. Interprétation et discussion des résultats

Le présent essai a pour but d'atteindre plusieurs objectifs. L'analyse des résultats portera sur plusieurs questions :

- Existe-t-il un profil socio-économique relié avec les ICU ?
- Existe-t-il une caractéristique structurelle du couvert végétation dans ces zones ?
- Est-il possible de prioriser des zones d'intervention en cas d'évènement de chaleur accablante ?

7.1. Comparaison et analyse des aires de diffusion de Sherbrooke à travers les données socio-économiques et l'ICU

Il y a une différence au niveau des taux de densité en ICU et IFU entre les aires de diffusion à l'intérieur du périmètre urbain et celles à l'extérieur. Il y a une plus grande concentration d'îlots de chaleur en milieu urbain. Les superficies d'ICU les plus élevées sont les AD centrales du périmètre urbain délimité. La concentration des îlots de fraîcheur est moins grande dans le milieu urbain en comparaison avec le milieu rural de Sherbrooke, ce qui était attendu. Les concentrations de superficie d'IFU par AD les plus hautes dans le périmètre urbain se trouvent en périphérie.

À travers la carte thématique sur cet indicateur, nous observons que le pourcentage de ménage à faible revenu est plus important dans le périmètre urbain de Sherbrooke qu'en dehors de cette limite. En milieu urbain, il y a une variation du pourcentage de maisons individuelles puisque les chiffres ne sont pas homogènes. Dans le périmètre rural, leur présence est plus importante et plus homogène. Les personnes âgées de plus de 65 ans et plus se retrouvent en ville bien qu'il y ait quelques concentrations en dehors du périmètre urbain. La carte indique qu'il y a plus de jeunes de moins de 15 ans à l'extérieur du milieu urbain.

Le Tableau 4 nous montre s'il existe pour chaque catégorie d'indicateurs socio-économiques une variation entre les données ou une dispersion des valeurs dans chaque facteur socio-économique choisi pour l'analyse. Nous remarquons à travers le coefficient de variation qu'à l'intérieur des indicateurs socio-économiques les données sont extrêmement éparpillées par sa haute valeur. Cela insinue qu'il n'y a pas de profil constant

qui ressort dans les données socio-économiques du milieu urbain. L'indicateur avec le coefficient le plus bas correspond aux enfants de moins de 15 ans, ce qui indique qu'il n'y a pas une grande dispersion de la donnée. Les données des catégories socio-économiques ne sont pas homogènes, ce qui permet de mettre en relation avec les données d'ICU ou d'IFU des AD. Si elles l'étaient, nous comprendrions que le milieu urbain de Sherbrooke serait notablement semblable, ce qui rendrait l'analyse faible puisque les autres données superposées ne changeraient pas les résultats ou l'interprétation.

Le Tableau 5 nous aide à voir la corrélation entre les données socio-économiques et les données d'ICU ainsi que celles d'IFU à travers deux variables (R^2 et F-Test), soit une analyse du modèle de régression. Ainsi, il aurait moyen de démontrer l'existence ou non d'une disparité socio-économique en présence d'îlots de chaleur urbains. Le coefficient de détermination (R^2) va de 0 à 1. Plus la valeur se rapproche de 1, mieux le modèle est entre deux variables (Huang et Chen, 2008). Avec le Tableau 5, nous remarquons qu'il n'y a aucun indicateur qui se rapproche de la valeur 1. Le coefficient de détermination le plus haut entre les données socio-économiques et celles d'ICU est les personnes à faible revenu (0,42) tandis qu'avec les données d'IFU, les enfants de moins de 15 ans ont le R^2 le plus élevé (0,12). Pour les données d'ICU, les enfants de moins de 15 ans et les données d'habitation ont un coefficient de détermination autour de 0,3 ce qui reste haut comparé au reste des indicateurs socio-économiques. Toutefois, les coefficients de détermination restent bas entre les variables dépendantes (données d'ICU et d'IFU) et indépendantes (indicateurs socio-économiques). Les R^2 entre les données socio-économiques et d'IFU sont proches de 0 ce qui implique que la variable indépendante n'influence pas les variables dépendantes. Les coefficients de détermination pour les données socio-économiques et d'ICU ne sont pas assez élevés non plus pour exprimer avec certitude une influence entre les deux variables. Le modèle statistique est explicatif, car les données sont exploitées dans le but de tester des hypothèses causales. Les facteurs sont mesurés par les variables indépendantes et dépendantes observées. Les modèles de régression sont un exemple commun du modèle d'explication. La prédiction n'est pas une fonction du modèle pratiqué dans cette recherche, car les données ne servent pas à prédire des observations nouvelles ou futures (Shmueli, 2010), mais bien à examiner l'hypothèse de causalité sur des théories construites.

Le F-Test permet de valider l'hypothèse nulle. Elle la valide lorsque la valeur de la catégorie est plus petite que celle critique pour F (Huang et Chen, 2015). L'hypothèse nulle exprime que les écarts-types des ensembles de données ne sont pas différents et que le modèle n'a pas de capacité à prédire, c'est-à-dire que si les écarts-types des ensembles de données sont similaires, le modèle sur la population pourrait être prédit selon l'échantillon. Majoritairement, nous acceptons l'hypothèse nulle, car les valeurs des indicateurs sont plus basses que la valeur critique de F associée. Si l'hypothèse nulle est validée, cela nous indique que les données ne soient pas survenues aléatoirement. Il y a un indicateur avec une valeur de F plus haute que celle critique pour les données d'IFU, soit les personnes à faible revenu. Il faudrait plus d'analyses pour pousser l'explication de cette situation de dispersion vraisemblable. L'étude statistique des données socio-économiques en lien avec les données d'ICU et d'IFU semble simple, mais nous donne un aperçu minimal de leur relation. Prendre les données AD par AD pourrait faire une différence puisque dans ce résultat le coefficient provient de l'équation de régression de chaque catégorie.

7.2. Évaluation de la qualité de l'indice de canopée urbaine dans la Ville de Sherbrooke

À la suite de la carte produite sur l'indice de canopée urbaine de Sherbrooke, nous remarquons bien qu'il y a un manque de couverture arborescente en milieu urbain ce qui amplifie les événements de canicules. Grâce aux modèles numériques d'élévation à partir du LiDAR, nous avons une connaissance différente de la canopée de Sherbrooke, car elle ne provient pas de la cartographie des ICU et n'a pas été utilisée pour produire cette dernière. La qualité de la matrice représentant le modèle numérique de canopée est toutefois médiocre comme le MNC n'est pas nettoyé optimalement. Des pixels résiduels ne font pas partie de la couverture arborescente, ce qui crée une certaine inexactitude. Le taux de canopée par AD pourrait être plus bas ce qui implique qu'il y aurait moins de couverts arborescents dans le milieu urbain de Sherbrooke que les résultats produits.

Cependant, grâce à la matrice du MNS normalisé nous remarquons bien que les ICU se superposent aux bâtiments tandis que les IFU se retrouvent au niveau des pixels de végétation et d'ombrage des bâtiments (Figure 16). Les cartographies d'ICU et d'IFU sont faites à l'aide de la végétation d'où la concordance avec les classes mentionnées

(végétation et zone d'ombre). Nous voyons cependant un décalage et une imprécision entre la matrice et les vecteurs. Il serait donc intéressant de réaliser des cartographies semblables à partir des données LiDAR. Finalement, la cartographie de l'indice de canopée urbaine par LiDAR se rapproche des cartes thématiques de la concentration d'ICU et d'IFU par AD. Par exemple, le AD avec l'indice de canopée la plus élevée équivaut en comparant à une densité d'IFU importante (41,3 %) et un pourcentage d'ICU relativement petit (9,3 %). Le AD avec un indice de canopée le plus bas contient 3,8 % d'IFU et 23,9 % d'ICU. Nous pouvons déduire qu'il est possible de déterminer les ICU et les IFU avec les données LiDAR ainsi que d'autres données spatiales.

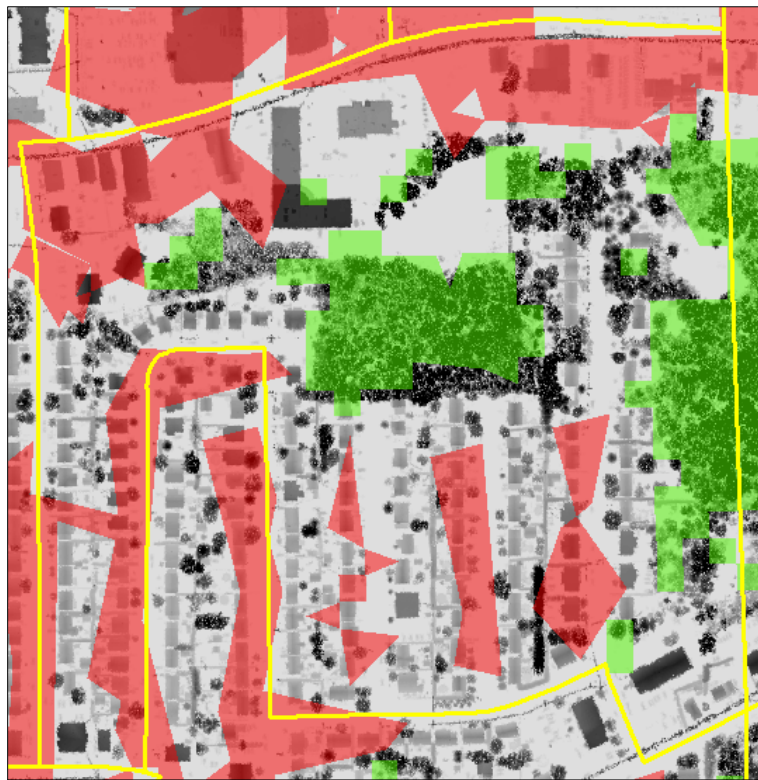


Figure 14. Exemple de l'AD 24430180 (en vert, les IFU; en rouge, les ICU; plus l'altitude est élevée, plus le pixel est sombre)

La cartographie de l'indice de canopée urbaine de Sherbrooke permet aussi d'avoir des statistiques sur la couverture arborescente dans son périmètre urbain. Il y a un manque selon les résultats (moyenne de 12 % pour Sherbrooke urbain). La carte nous montre qu'il y a un nombre important d'AD en rouge qui indique un indice de canopée urbaine bas. Les AD en vert (pourcentage de canopée important) se retrouvent proches des limites de la

zone urbaine. Le seul arrondissement sans AD dans la première classe d'indice de canopée urbaine, soit en rouge, est celui de Lennoxville. Soixante-quatre (64) AD éparpillées sur les arrondissements restants ont moins de 7,53 % de leur superficie couverte d'arbres. Trois (03) arrondissements dans Sherbrooke contiennent un nombre significatif d'AD en rouge et ces derniers sont les arrondissements de Fleurimont (24 AD), du Mont-Bellevue (15 AD) et de Jacques-Cartier (12 AD). Aucun AD en milieu urbain ne possède un couvert végétal représentant 50 % de leur superficie. Il faut noter que la moitié des AD a moins de 10 % de couvert végétal. Une grande quantité d'AD se trouve avec un couvert arborescent entre 5 à 10 % (79 AD) et entre 10 à 15 % (50 AD) sur les 189 AD urbains. Ces AD s'étalent majoritairement sur les trois arrondissements mentionnés plus haut, car ces derniers couvrent en partie les AD en milieu urbain. Les quatre AD urbains dans l'arrondissement de Lennoxville ont un indice plus haut que 12,03 %. L'arrondissement de Brompton a parmi ses limites deux AD urbains, l'un rouge et l'autre vert. Il y a une mixité d'indice de canopée urbain dans l'arrondissement de Rock Forest–Saint-Élie–Deauville.

7.3. Évaluation de la qualité des lieux à prioriser lors des canicules dans la Ville de Sherbrooke

Pour prioriser les zones d'intervention, nous avons adapté les pondérations pour calcul de l'indicateur. Nous avons choisi d'affecter soit 60 % pour la santé, 20 % pour l'économie et 20 % pour l'environnement. De plus, l'indicateur utilisé ne tient pas compte des mêmes informations par manque de données. Seules, les pondérations des catégories ont été conservées. L'aspect économique des AD ne considère que les pourcentages des ménages à faible revenu puisque les familles peuvent être restreintes financièrement pour alléger leur confort lors des périodes de canicules. L'aspect santé est représenté par les populations de jeune âge et les personnes âgées, car elles sont plus vulnérables face à une température élevée. Le niveau de risque des AD de Sherbrooke ne dépasse pas 0,4 sur un risque maximal possible de 1. Les valeurs sont faibles dues aux pourcentages des enfants de moins de 15 ans et de sa pondération de 0,3. Comme aucune AD ne dépasse 29,3 % de population de moins de 15 ans, le score total diminue le niveau de risque lors des canicules. Les personnes de plus de 65 ans causeraient aussi les faibles valeurs du niveau de risque de la même manière. En revanche, il est important de ne pas oublier que la vulnérabilité des AD face

aux canicules affecte grandement ces citoyens. Sans habitants, le risque n'est pas présent puisque personne ne subit les conséquences des périodes de températures extrêmes et/ou des îlots de chaleur urbains. La valeur de chaque AD pour les lieux à prioriser reste représentative de son niveau de risque.

Nous retrouvons 17 AD (Tableau 7) à prioriser (en rouge dans la carte à cet effet). Ces AD s'étalent sur les arrondissements de Fleurimont (6 AD), du Mont-Bellevue (5,5 AD) et de Jacques-Cartier (5,5 AD). Il y a un AD qui chevauche deux arrondissements. Ce résultat semble logique puisqu'à travers la littérature, nous savons que l'arrondissement de Jacques-Cartier possède un important taux d'habitants de 65 ans et plus, soit une personne sur quatre (Sage-Innovation, 2015). De plus, nous avons une connaissance sur les arrondissements qui possèdent des AD avec un taux de canopée bas qui sont les mêmes nommées ci-haut. Les lieux non prioritaires sont aux limites du périmètre urbain. Nous savons que ces endroits sont aussi ceux qui contiennent pour certains un haut pourcentage de canopée. La moyenne totale du taux de risque est de 0,26. Un bas taux de canopée n'indique pas forcément un haut taux du potentiel de risque puisqu'il faut prendre en compte la situation financière et l'âge des citoyens de l'AD.

Il faut aussi prendre en considération l'utilisation du territoire ainsi que de son aménagement. Par exemple, le Carrefour de l'Estrée, un site d'intérêt, se trouve dans une zone à risque en rouge. Alors, les quartiers dans ses alentours sont à prioriser. L'Échangeur Darche est également à proximité d'une zone rouge à prioriser lors des interventions. Les citoyens proches des superficies asphaltées devraient être sensibilisés en premier. Toutefois, il y a des quartiers avoisinants des aires aménagées (parcs, espaces verts) qui sont dans les AD rouges. Les indicateurs socio-économiques des AD changent le niveau de risque, mais on remarque qu'un taux bas en canopée (Tableau 7) affecte grandement cet indice. En moyenne, les gens qui côtoient les AD à prioriser lors des interventions pendant les périodes de canicules ont un taux de ménages de faible revenu important. On y retrouve peu de maisons individuelles. Le tiers des habitants sont des personnes de plus de 65 ans et 10 % de ces AD ont des jeunes de moins de 15 ans dans ses limites.

8. Conclusion, limites et recommandations

Le travail réalisé dans l'essai a pour but de voir la disparité socio-économique en présence d'îlots de chaleur en milieu urbain dans la Ville de Sherbrooke. Pour atteindre cet objectif, trois objectifs secondaires ont été élaborés. Premièrement, un portrait socio-économique de la population de la Ville de Sherbrooke a été fait et une analyse spatiale a été réalisée en tenant compte des ICU ainsi que des IFU. L'idée était d'identifier le profil de la population en présence d'îlots de chaleur urbains. Malheureusement, les données de recensement disponibles s'arrêtent au niveau de l'aire de diffusion (400 à 700 personnes), car les îlots de diffusion (territoire qui équivaut à un pâté de maisons) ne donnent accès qu'aux chiffres de la population et des logements pour une question de confidentialité (Statistique Canada, 2019c). À ce niveau, les polygones représentant les îlots de diffusion auraient dans ces limites ou à proximité de ces limites des ICU. Le profil qui en ressortirait reviendrait au portrait global de la population de la Ville de Sherbrooke. Deux critères ont été utilisés pour déterminer la concordance entre un paramètre socio-économique et les ICU, soit le coefficient de détermination R^2 et le test F qui suit la loi de Fisher. Les résultats montrent qu'aucun profil socio-économique particulier ne ressort à cause de l'homogénéité des valeurs par AD dans la Ville de Sherbrooke. Il faudrait pousser l'analyse et disposer d'autres données pour démontrer une causalité des deux variables. On ressort toutefois que les ménages à faible revenu sont présents dans les AD concentrées en ICU.

Deuxièmement, un indice de canopée urbaine a été développé afin de comprendre la relation entre la couverture arborescente dans le milieu urbain sherbrookoïse et la présence des ICU. L'indice de canopée urbaine pour la Ville de Sherbrooke est en moyenne de 12 %, ce qui est relativement bas en comparaison à Montréal qui est à 20 % avec l'intention de l'augmenter à 25 % d'ici 2025. Les îlots de chaleur urbains dans la ville sont composés en général de 10 % d'arbres sur leur superficie. Ce faible chiffre peut être dû à l'approche méthodologique développée et au nettoyage important du couvert végétal par cette méthode. Les arbres constituent des actions concrètes contre les ICU. La Ville de Sherbrooke semble présenter quelques lacunes sur cet aspect. Il serait possible d'améliorer la lutte contre les îlots de chaleur en augmentant la présence des arbres sur le territoire. Le milieu urbain de Sherbrooke est désavantagé en comparaison au milieu rural. Les citoyens

du premier milieu font face à une vulnérabilité plus grande aux chaleurs accablantes. Des plans pour bonifier la superficie de couverture arborescente en milieu urbain devraient être élaborés pour limiter les nuisances des ICU. Les résultats sur l'indice de canopée urbaine pourraient être améliorés, car le MNC aurait pu être plus précis et présenter moins de pixels résiduels s'il avait été créé directement à partir des données LiDAR brutes. Pour ce travail, les modèles numériques dérivés du LiDAR ont été manipulés. Le MNC possède malheureusement un bruit et chaque pixel de bruit est d'une résolution de 1 mètre. De plus, la présence des câbles électriques affecte également le MNC comme ils sont en hauteur et n'ont pas pu être enlevés. Un traitement plus fin devrait être fait, mais dans le cadre de l'essai il était difficile à réaliser. Le traitement de base a pris beaucoup de temps, car il s'agit d'un jeu de données de 727 tuiles pour la Ville de Sherbrooke. Il serait bon d'avoir accès aux données sur les structures pour toutes études futures puisqu'elles permettent de réduire les erreurs et apportent une précision sur l'information environnementale. Par ailleurs, l'indice de canopée urbaine ne prend en compte que la végétation de plus de 7 mètres puisqu'elle représente en soi la hauteur minimale d'une canopée. Les autres types de plantes et les espaces plans verts ne sont pas à l'étude et les intégrer pourrait changer les résultats ainsi que l'interprétation de ces derniers puisqu'ils apportent leurs bénéfices contre aux îlots de chaleur. L'affectation des sols n'est pas prise en considération dans l'analyse. Il faudrait l'ajouter pour des études futures, car elle aide à approfondir la compréhension des îlots de chaleur puisque chaque utilisation amène une modification de l'environnement qui affecte la présence d'ICU. Les usines ou les secteurs industriels prônent à cette présence, car les terrains à grande surface possèdent moins de couverts végétaux et les activités anthropiques apportent une chaleur importante.

Finalement, il y a eu une identification des lieux à prioriser (AD en rouge de la Figure 10) pour les interventions lors des périodes de canicules ou de températures extrêmes ce qui offre un outil de décisions aux acteurs locaux afin d'harmoniser le cadre environnemental auprès des citoyens vulnérables en présence d'ICU. La formule du risque de cette recherche a été adaptée et simplifiée à partir de la littérature. Afin d'avoir une meilleure précision des zones à risque par rapport aux ICU, il serait important d'avoir de nombreuses données et plusieurs niveaux de pondération par donnée pour une catégorie. Par exemple, il faudrait des critères et des sous-critères, la définition de leur poids, les calculs de leur valeur brute,

la conversion de cette valeur brute sur une échelle établie et les calculs de la valeur pondérée pour chaque critère ainsi que le calcul de l'indice.

En bref, le but de l'essai était de mieux comprendre le profil des populations affecté par les ICU dans la Ville de Sherbrooke et la structure végétale qui se retrouve dans leur zone. Bien que certains résultats ne soient pas concluants, l'approche mise en place a démontré un certain intérêt. Il serait toutefois nécessaire d'approfondir la méthode afin de conclure avec plus de précision. Nous pouvons déduire que les données d'ICU ou d'IFU ne sont pas influencées explicitement par la situation socio-économique des citoyens. La certitude d'une disparité socio-économique en présence d'ICU n'est pas exprimée. En revanche, des données socio-économiques ont un écart-type se rapprochant des données d'ICU et d'IFU, ce qui indique une certaine corrélation (personnes à faible revenu, locataires, maisons individuelles et logements de plus de cinq étages). Le manque de couvert arborescent urbain serait possiblement une des causes de la présence importante d'ICU. Les périodes de canicules sont à anticiper puisqu'elles vont être récurrentes à cause des changements climatiques (Ruel-Manseau, 2019).

9. Références

Altoa (2019) Produits et applications, [En ligne]. <http://www.altoa.org/fr/produits-mns-et-mnt.html> (Page consultée le 20 mars 2019).

Apparicio, P., Pham, T.-T.-H., Séguin, A.-M. *et al.* (2013) Équité environnementale et distribution spatiale de la végétation à l'intérieur et autour des îlots résidentiels à Montréal : une double iniquité ? *Cahiers de géographie du Québec*, 57, 161, p. 215-237.

Apparicio, P., Cloutier, M.-S., Séguin, A.-M. *et al.* (2010) Accessibilité spatiale aux parcs urbains pour les enfants et injustice environnementale, *Revue internationale de géomatique*, 20, 3, p. 363-389.

Anquez, P. et Herlem, A. (2011) Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions. *Chaire de responsabilité sociale et de développement durable*, ESG UQÀM, 19 p.

ArcGIS (2019) Image classification using the ArcGIS Spatial Analyst extension, [En ligne]. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/extensions/spatial-analyst/image-classification/image-classification-using-spatial-analyst.htm> (Page consultée le 20 mars 2019).

Baudoin, Y., Leprince, J. et Perez, C. (2007) Représentations cartographiques de la Communauté métropolitaine de Montréal : Annexe 2 : Les îlots de chaleur (2005) et l'évolution thermique (1984-2005); Annexe 3 : l'indice de végétation (2005) et son évolution (1984-2005), [En ligne]. http://cmm.qc.ca/biotopes/docs/volet_presentation.pdf (Page consultée le 3 novembre 2018).

Becker, M., Picard, J.-F. et Timial, J. (1982) *Larousse des arbres, des arbustes et des arbrisseaux de l'Europe occidentale*, Larousse, 330 p.

Bénice, B. (2018) La canicule a fait près de 90 victimes au Québec, [En ligne]. <https://www.lapresse.ca/actualites/grand-montreal/201807/18/01-5190016-la-canicule-a-fait-pres-de-90-victimes-au-quebec.php> (Page consultée le 18 novembre 2018).

Boulfroy, E., Khaldoune, J., Grenon, F., Fournier R., et Talbot, B. (2013) Conservation des îlots de fraîcheur urbains - Description de la méthode suivie pour identifier et localiser les îlots de fraîcheur et de chaleur (méthode en 9 niveaux). CERFO et Université de Sherbrooke, Rapport 2012-11c, 40 p.

Bourque, A. (2000) Les changements climatiques et leurs impacts. [En ligne]. <https://journals.openedition.org/vertigo/4042> (Page consultée le 1 septembre 2019).

CERFO (2013a) Identification et localisation des îlots de chaleur et de fraîcheur pour tout le Québec urbain. Note technique, 1, 8 p.

CERFO (2013b) Développement d'outils pour la conservation des îlots de fraîcheur en milieu urbain par Emmanuelle Boulfroy, [En ligne]. http://www.oifq.com/images/pdf/presentation_cafe_19mars2013.pdf (Page consultée le 31 mars 2018).

CERFO (2015) Une méthode novatrice pour cartographier la canopée de la ville de Québec : la classification orientée-objet utilisant le proche infrarouge. Note technique, 2, 4 p.

CIUSSS (2018) Canicule : juillet 2018 – Montréal bilan préliminaire, [En ligne]. https://santemontreal.qc.ca/fileadmin/fichiers/actualites/2018/07_juillet/BilanCaniculeV2.pdf (Page consultée le 3 novembre 2018).

Communauté métropolitaine de Montréal (2017) Indice canopée métropolitain. Méthodologie, 5 p.

Coulombe, B. (2016) Le grand recensement renaît de ses cendres, [En ligne]. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/764031/canada-recensement-formulaire-long-gouvernement-trudeau-statistique-canada-inrs> (Page consultée le 7 mars 2019).

Données Québec (2019) Périmètre urbain, [En ligne]. https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/101d5d156a364924ace19b9215611880_7 (Page consultée le 7 mars 2019).

Doungmo, Y. A. (2017) Différence entre MNT, MNA, MNE et applications, [En ligne]. <https://www.linkedin.com/pulse/diff%C3%A9rence-entre-mnt-mna-mne-et-applications-yannick-arthur-doungmo/> (Page consultée le 20 mars 2019).

Équiterre (2019) La science du climat pour expliquer le changement climatique, [En ligne]. <https://equiterre.org/fiche/la-science-du-climat-pour-expliquer-le-changement-climatique> (Page consultée le 2 novembre 2018).

Enviro-accès (2013) Plan d'adaptation aux changements climatiques 2013 - 2023 Ville de Sherbrooke. Présenté à : Madame Christine Fliesen Chef de la Division de l'environnement, 160 p.

Faburel, G. (2012) La ville durable aux défis des injustices environnementales - Constats empiriques et enjeux sociopolitiques. Flux, 89-90, 3, 2012, p. 15-29.

Filiatreault, Y. (2015) Changements climatiques et îlots de chaleur : indicateurs de performance pour les mesures d'adaptation. Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, 93 p.

Fortin, M.-J. (2005) Paysage industriel, lieu de médiation sociale et enjeu de développement durable et de justice environnementale : les cas des complexes d'Alcan (Alma, Québec) et de Pechiney (Dunkerque, France). Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 557 p.

Fol, S. et Pflieger, G. (2010) La justice environnementale au États-Unis : construction et usages d'une catégorie d'analyse et d'une catégorie d'action. *Justice spatiale|Spatial justice*, 2, 13 p.

Gaumont, C. (2019) Les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique, [En ligne]. <http://cremtl.qc.ca/publication/entrevues/2007/les-ilots-chaleur-urbains-rechauffement-climatique-pollution> (Page consultée le 3 novembre 2018).

Gendron-Bouchard, J.-P. (2013) Analyse des outils administratifs et des mesures de lutte aux îlots de chaleur dans les milieux de vie des communautés thermiquement vulnérables à Montréal. Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, 133 p.

Huang, L.-S. et Chen, J. (2008) Analysis of variance, coefficient of determination and f-test for local polynomial regression. *The Annals of Statistics*, 36, 5, p. 2085–2109.

Huang, G., Zhou, W. et Cadenasso, M. L. (2011) Is everyone hot in the city? Spatial pattern of land surface temperatures, land cover and neighborhood socioeconomic characteristics in Baltimore, MD. *Journal of Environmental Management*, 92, p. 1753-1759.

Ho, H. C., Knudby, A., Chi, G., *et al.* (2018) Spatiotemporal analysis of regional socio-economic vulnerability change associated with heat risks in Canada. *Applied Geography*, 95, p. 61–70.

Institut national de santé publique (s.d) Îlot de chaleur, [En ligne]. <http://www.monclimatmasante.qc.ca/%C3%AEilots-de-chaleur.aspx> (Page consultée le 4 novembre 2018).

Institut national de santé publique (2009) Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Revue de littérature, Gouvernement du Québec, Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, 95 p.

Institut national de santé publique (2017) Verdir les villes pour la santé de la population. Gouvernement du Québec, Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Revue de la littérature, 111 p.

Lareau, F. et Maletto, A. (2019) Identification des risques associés à la chaleur pour l'intervention, l'adaptation et la planification urbaine. Présentation d'ESRI Canada, 27 diaporamas.

Larière, C. (2017) (dir) Les inégalités environnementales. Puf-Vie des idées, Paris, 104 p.

Kestens, Y., Brand, A., Fournier, M., Goudreau, S., *et al.* (2011) Modelling the variation of land surface temperature as determinant of risk of heat-related health events. *International Journal of Health Geographics*, p. 2-9.

Keucheyan, R. (2018) La nature est un champ de bataille. Essai d'écologie politique, Poche/Sciences humaines et sociales, Paris : La Découverte, 234 p.

Matasci G., Coops, N. C., Williams, D. A. R. et Page, N. (2018) Mapping tree canopies in urban environments using airborne laser scanning (ALS): a Vancouver case study. *Forest Ecosystems*, 5, 31, 9 p.

MELCC (2019) Faits saillants, [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2018/canicule.htm> (Page consultée le 18 novembre 2018).

MERN (2015) Levés laser aéroporté (lidar), classification des données et production de produits dérivés pour des territoires couvrant la ville de Sherbrooke et son aéroport. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles, Direction générale de l'information géographique, Rapport technique, 33 p.

Montréal (2019) Canopée et les îlots de chaleur, [En ligne]. http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7377,91101652&_dad=portal&_schema=PORTAL (Page consultée le 20 mars 2019).

Mika, J., Forgo, P., Lakatos, L., Olah, A. B. *et al.* (2018) Impact of 1,5 K global warming on urban air pollution and heat island with outlook on human health effects. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 30, p. 151-159.

Nature Québec (2011) Les changements climatiques : quels en sont les causes et les impacts? Fiche, Projet Agriculture et climat : vers des fermes zéro carbone, 4 p.

Nayoufal, N. (2016) Connexions entre la justice environnementale, l'écologisme populaire et l'écocitoyenneté. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, 16, 1, 26 p.

Parmentier, A. (2010) Élaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, 108 p.

Pham, T. T. H., Apparicio, P., Séguin, A.-M. *et al.* (2010) Végétation urbaine et injustice environnementale à Montréal : exploration du cas de trois arrondissements centraux à partir de l'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale. Inédit/Working paper 5, UCS INRS, 48 p.

Pitre, P. (2008) Une approche SIG pour l'identification des zones et des populations à risque en période de canicule. Présentation, Centre de recherche Léa-Roback, 23 mai 2008; Département de médecine sociale et préventive, Université de Montréal, 36 p.

RNCREQ (2019) Faire face aux changements climatiques en Estrie. Feuillet, 4 p.

Ruel-Manseau, A. (2019) Le Canada se réchauffe deux fois plus vite que la Terre, [En ligne]. http://plus.lapresse.ca/screens/0a3c26cd-83cf-476c-9813-4c05fa86b5fe_7C_0.html (Page consultée le 27 février 2019).

Sage-Innovation (2015) Portrait des besoins des aînés de la ville de Sherbrooke. Dans le cadre du mandat Qualité de vie des aînés de l'organisme à but non-lucratif SAGE-Innovation (SAGE pour Santé-Autonomie-Gérontechnologies-Estrie), 60 p.

Scarwell, H.-J. (2019) La justice environnementale : aspects juridiques. Droit, 3 p.

Shmueli, G. (2010) To explain ou to predict. Statistical Science, 25, 3, p. 289-310.

Statistique Canada (2019a) L'aire de diffusion agrégée (ADA) : une nouvelle région géographique pour la diffusion du recensement, [En ligne]. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/geo/ADA/adainfo-fra.cfm> (Page consultée le 27 février 2019).

Statistique Canada (2019b) Aire de diffusion (AD), [En ligne]. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92-195-x/2011001/geo/da-ad/da-ad-fra.htm> (Page consultée le 27 février 2019).

Statistique Canada (2019c) Îlot de diffusion (ID), [En ligne]. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/ref/dict/geo014-fra.cfm> (Page consultée le 3 mars 2019).

Statistique Canada (2017). Série « Perspective géographique », Recensement de 2016. Produit n°98-404-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa, Ontario. Produits de données, Recensement de 2016.

Taylor, J., Wilkinson, P., Dabies, M., Amstrong, B. *et al.* (2015) Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London. *Urban climate*, 14, p. 517-528.

Ville de Montréal (2019) Indice de canopée à Montréal, [En ligne]. http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7377,91101669&_dad=portal&_schema=PORTAL (Page consultée le 31 janvier 2019).

Ville de Sherbrooke (2014) Schéma d'aménagement et de développement révisé – Règlement N° 1000, [En ligne]. <https://www.ville.sherbrooke.qc.ca/fileadmin/fichiers/Planification/Sch%C3%A9ma%20-%20Version%20finale%20octobre%202014-entr%C3%A9e%20en%20vigueur.pdf> (Page consultée le 4 novembre 2018).

Ville de Sherbrooke (2019) Portrait de la Ville, [En ligne]. <https://www.ville.sherbrooke.qc.ca/services-municipaux/service-de-la-planification-urbaine-et-du-developpement-durable/portrait-de-la-ville/> (Page consultée le 14 février 2019).

Wang Y., et Akbari, H. (2016) Analysis of urban heat island phenomenon and mitigation solutions evaluation for Montreal. *Sustainable Cities and Society*, 26, p. 438-446.

Warren, F. J., Barrow, E., Schwartz, R., Andrey, J. *et al.* (2004) Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne. Programme sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques, Direction des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, Gouvernement du Canada, 219 p.

Wolch, J. R., Byrne, J. et Newell, J. P. (2014) Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. *Landscape and Urban Planning*, 124, p. 234-244.